

**NANOPARTİKÜL TAKVİYELİ ARAMİD ESASLI BALİSTİK KUMAŞLARIN
BALİSTİK PERFORMANSININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bilal KÜÇÜK

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Yelda Akçin ERGÜN

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ

Ağustos 2024

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**NANOPARTİKÜL TAKVİYELİ ARAMİD ESASLI BALİSTİK
KUMAŞLARIN BALİSTİK PERFORMANSININ İNCELENMESİ**

Bilal KÜÇÜK

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Yelda Akçin ERGÜN

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ

Ağustos 2024

TEZ ONAY SAYFASI

Bilal KÜÇÜK tarafından hazırlanan “Tez Onay Sayfası” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 07 / 08 / 2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Yelda Akçin ERGÜN

Başkan : Dr. Öğr. Üyesi İ. Sinan ATLI
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Yelda Akçin ERGÜN
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Faruk Emre AYSAL
Giresun Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
..... /..... /..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Prof. Dr. Bekir YALÇIN
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

07 / 08 / 2024

İmza

Bilal KÜÇÜK

ÖZET
Yüksek Lisans Tezi

**NANOPARTİKÜL TAKVİYELİ ARAMİD ESASLI BALİSTİK KUMAŞLARIN
BALİSTİK PERFORMANSININ İNCELENMESİ**

Bilal KÜÇÜK
Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Yelda Akçin ERGÜN

Bu araştırmada, aramid esaslı balistik kumaşlarda nanopartikül takviyesinin balistik performansa olan etkisi araştırılmıştır. Nanopartikül takviyesi olarak titanyum karbür tercih edilirken, matris malzemesi olarak ise epoksi reçine kullanılmıştır. Epoksi matris içerisine epoksi reçine-sertleştirici toplam ağırlığının %1, % 3 ve %5'i oranlarında takviye edilen titanyum karbür nanopartikülünün saf epoksi reçine ile hazırlanan numunelere göre balistik performansının kıyaslandığı bu çalışmada ayrıca mekanik özelliklerde meydana gelen değişimler araştırılması maksadıyla çekme ve 3 nokta eğme deneyleri de yapılmıştır. Epoksi reçine içerisine takviye edilen titanyum karbür nanopartiküllerinin homojen bir şekilde dağılmasının sağlanması amacıyla ultrasonik karıştırıcı kullanılarak hazırlanan karışımlar aramid kumaşlara el yatırması yöntemi kullanılarak nüfuz ettirilmiş ve sıcak presleme ile kompozit plaka haline getirilmiştir. Titanyum karbür takviyeli ve saf epoksili olarak hazırlanan numunelere uygulanan mekanik testler sonucunda nanopartikül takviyesinin mekanik özellikleri iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Balistik performansın belirlenmesi maksadıyla mekanik testlerde en iyi sonuçların elde edildiği ağırlıkça %3 ve %5 karışım oranlarına sahip numunelere yapılan balistik test sonucunda TiC nanopartikülünün balistik özelliklere olumlu veya olumsuz etkisinin olmadığı tespit edilmiştir.

2024, xi + 79 sayfa

Anahtar Kelimeler: Aramid, Epoksi, Nanopartikül, Titanyum Karbür, Balistik

ABSTRACT
M.Sc. Thesis

**INVESTIGATION OF BALLISTIC PERFORMANCE OF NANOPARTICLE
REINFORCED ARAMİD BASED BALLİSTİC FABRİCS**

Bilal KÜÇÜK

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Metallurgy and Materials Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Yelda Akçin ERGÜN

In this study, the effect of nanoparticle reinforcement on the ballistic performance of aramid-based ballistic fabrics was investigated. Titanium carbide was chosen as the nanoparticle reinforcement, while epoxy resin was used as the matrix material. To compare the ballistic performance of samples prepared with pure epoxy resin, titanium carbide nanoparticles were added to the epoxy matrix at concentrations of 1%, 3%, and 5% by weight of the total epoxy resin-hardener mixture. Tensile and three-point bending tests were also conducted to investigate changes in mechanical properties. To ensure the homogeneous dispersion of titanium carbide nanoparticles within the epoxy resin, ultrasonic mixing was employed, and the resulting mixtures were impregnated into aramid fabrics using the hand lay-up method, followed by hot pressing to form composite plates. As a result of mechanical tests applied to samples prepared with titanium carbide reinforcement and pure epoxy, it was observed that nanoparticle reinforcement improved mechanical properties. As a result of the ballistic test performed on samples with mixture ratios of 3 and 5% by weight, where the best results were obtained in mechanical tests in order to determine the ballistic performance, it was determined that the TiC nanoparticle did not have a positive or negative effect on the ballistic properties.

2024, xi +79 pages

Keywords: Aramid, Epoxy, Nanoparticle, Titanium Carbide, Ballistic

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Yelda AKÇİN ERGÜN, mekanik testlerin yapılmasında bilgi aktarımı ve emeklerinden dolayı Dr.Öğr. Üyesi İsmail Sinan ATLI ve Arş. Gör. Mahmud Cemaleddin YALÇIN'a her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Çalışmada kullanılan numunelerin hazırlanması ve balistik testlerin yapılması için çalışma imkanı sağlayan MSB 8'inci Ana Bakım Fabrika Müdürü Müh.Alb. Tayfun EMİRZEOĞLU'na, balistik testlerinin yapılmasında emekleri olan MSB 8'inci Ana Bakım Fabrika Müdürlüğü Balistik Test ve Analiz Laboratuvarı personeline ve çalışma süresince destek ve yardımlarını esirgemeyen amirlerim ile mesai arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Lisans eğitimi döneminde de yanımda olan ve yüksek lisans eğitimim ile tez yazım sürecinde her zaman yardım ve desteğini benden esirgemeyen hayat arkadaşım, sevgili eşim Seher KÜÇÜK'e sonsuz teşekkür ederim.

Bilal KÜÇÜK
Afyonkarahisar 2024

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
RESİMLER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	3
2.1 Kompozit Malzeme Bilimi	3
2.1.1 Kompozit Malzeme Türleri.....	4
2.1.1.1 Seramik Matris Kompozitleri.....	5
2.1.1.2 Metal Matris Kompozitleri.....	6
2.1.1.3 Polimer Matris Kompozitleri	6
2.1.2 Polimer Matrisli Kompozit Üretim Yöntemleri.....	6
2.1.2.1 El Yatırma Yöntemi	7
2.1.2.2 Vakum İnfüzyon Yöntemi.....	7
2.1.2.3 Açık Kalıplama Yöntemi	7
2.1.2.4 Reçine Transfer Kalıplama Yöntemi	8
2.1.2.5 Prepreg Yöntemi	8
2.1.2.6 Filament Sarma Yöntemi	9
2.1.2.7 Pultrüzyon ve Ekstrüzyon Yöntemleri	9
2.2 Balistik Bilimi ve Balistik Türleri	10

2.2.1 İç Balistik	11
2.2.2 Dış Balistik.....	11
2.2.3 Terminal Balistiği.....	12
2.2.3.1 Yara Balistiği.....	13
2.2.3.2 Penetrasyon Potansiyeli.....	13
2.3 Balistikte Çözümlere Etki Eden Faktörler	14
2.4 Balistikte Kullanılan Polimer Matris Kompozitleri.....	16
2.4.1 Aramid Esaslı Balistik Zırh Kumaşı	17
2.4.2 Ultra Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen Esaslı Balistik Zırh Kumaşı ..	18
2.5 Polimer Reçineler	19
2.6 Nanopartikül Teknolojisi	20
2.6.1 Nanopartikül.....	21
2.6.2 Balistikte Kullanılan Nanopartiküller	22
2.6.2.1 Nanokil	23
2.6.2.2 Grafen.....	23
2.6.2.3 Karbon Nanotüp	24
2.6.2.4 Titanyum Karbür	25
2.6.3 Nanopartikül Takviyesinin Mekanik ve Balistik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi	26
2.6.3.1 Nanokil Kullanımının Etkilerinin İncelenmesi	26
2.6.3.2 Grafen Kullanımının Etkilerinin İncelenmesi	33
2.6.3.3 Karbon Nanotüp Kullanımının Etkilerinin İncelenmesi	37
2.6.3.4 Titanyum Karbür Kullanımının Etkilerinin İncelenmesi	41
3. MATERYAL ve METOT	45
3.1 Kullanılan Malzemelerin Belirlenmesi	45

3.1.1 Aramid Esaslı Balistik Kumaş	45
3.1.2 Epoksi Reçine.....	46
3.1.3 Nanopartikül Takviyesi	46
3.2 Numunelerin Hazırlanması	47
3.3 Mekanik Testlerin Yapılması.....	49
3.3.1 Çekme Testi	49
3.3.2 3 Nokta Eğme Testi.....	51
3.4 Balistik Testlerin Yapılması	51
4. BULGULAR	53
4.1 Nanotoz Takviyesinin Çekme Dayanımına Olan Etkisi	53
4.2 Nanotoz Takviyesinin Eğilme Dayanımına Olan Etkisi	61
4.3 Nanotoz Takviyesinin Balistik Performansa Etkisi	63
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	70
6. KAYNAKLAR.....	74

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

g	Gram
cm	Santimetre
m	Metre
GPa	Gigapascal
TPa	Terapascal
MPa	Megapascal
mohm	Megaohm
Al ₂ O ₃	Alüminyum oksit
SiC	Silisyum karbür
Si ₃ N ₄	Silisyum Nitrür
B ₄ C	Bor karbür
TiC	Titanyum karbür
TiB ₂	Titanyum diborür
TiN	Titanyum nitrür
AlN	Alüminyum nitrür

Kısaltmalar

TiC	Titanyum karbür
KNT	Karbon nanotüp
UHMWPE	Ultra high molecular weight polyethylene
MMK	Metal matris kompozitler
SMK	Seramik matris kompozitler
PMK	Polimer matris kompozitler

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1: Para-Aramid'in Kimyasal Yapısı	17
Şekil 2.2: Nanokil Takviyesinin Elastisite Modülüne Etkisi	30
Şekil 2.3: Nanokil Takviyesinin Çekme Dayanımına Etkisi	31
Şekil 2.4: Nanokil Takviyesinin Eğilme Direncine Etkisi	31
Şekil 2.5: Grafen İlavesinin Çekme Mukavemetine Etkisi	34
Şekil 2.6: Grafen Katkısının Eğilme Dayanımına Etkisi	36
Şekil 2.7: Grafen Katkısının Çekme Dayanımına Etkisi	37
Şekil 2.8: Karbon Nanotüp İlavesinin Çekme Dayanımına Etkisi.....	38
Şekil 2.9: Karbon Nanotüp İlavesinin Eğilme Dayanımına Etkisi	39
Şekil 2.10: Karbon Nanotüp Takviyesinin Darbe Enerjisine Etkisi.....	41
Şekil 2.11: TiC Takviyesinin Darbe Direncine Etkisi	42
Şekil 4.1: Epoksi Matrisine TiC Takviye Edilmiş Numunelerde Elde Edilen Ortalama Çekme Mukavemeti Değerleri.....	53
Şekil 4.2: Epoksi Matrisine TiC Takviye Edilmiş Numunelerde Elde Edilen Ortalama Elastisite Modülü Değerleri.....	54
Şekil 4.3: Katkısız Epoksi Matrisli Numunelerin Çekme Mukavemeti	54
Şekil 4.4: Katkısız Epoksi Matrisli Numunelerin Elastisite Modülü.....	55
Şekil 4.5: Epoksi Matrisine Ağırlıkça %1 TiC Takviye Edilmiş Numunelerin Çekme Mukavemeti	55
Şekil 4.6: Epoksi Matrisine Ağırlıkça %1 TiC Takviye Edilmiş Numunelerin Elastisite Modülü	56

Şekil 4.7: Epoksi Matrisine Ağırlıkça %3 TiC Takviye Edilmiş Numunelerin Çekme Mukavemeti.....	56
Şekil 4.8: Epoksi Matrisine Ağırlıkça %3 TiC Takviye Edilmiş Numunelerin Elastisite Modülü	57
Şekil 4.9: Epoksi Matrisine Ağırlıkça %5 TiC Takviye Edilmiş Numunelerin Çekme Mukavemeti.....	57
Şekil 4.10: Epoksi Matrisine Ağırlıkça %5 TiC Takviye Edilmiş Numunelerin Elastisite Modülü	58
Şekil 4.11: Epoksi Matrisine TiC Takviyesinin Ortalama Çekme Mukavemetlerine Etkileri	60
Şekil 4.12: Epoksi Matrisine TiC Takviyesinin Ortalama Elastisite Modülüne Etkileri	60
Şekil 4.13: Epoksi Matrisine TiC Takviyesinin Eğilme Mukavemetine Etkisi.....	62
Şekil 4.14: Epoksi Matrisine TiC Takviyesinin Eğilme Elastisite Modülüne Etkisi.....	63

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1: Kevlar Kumaşın Fiziksel Özellikleri	18
Çizelge 2.2: Karbon Nanotüplerin Özellikleri	25
Çizelge 2.3: Nanokil Takviyeli Numunlerde Çekme Testi Sonuçları.....	30
Çizelge 2.4: Grafen İlavesinin Eğilme Mukavemetine Etkisi.....	35
Çizelge 2.5: TiC Takviyesinin Elastisite Modülüne Etkisi.....	42
Çizelge 2.6 TiC Takviyesinin Çekme Mukavemetine Etkisi	43
Çizelge 4.1: Çekme Testi Sonucunda Elde Edilen Çekme Mukavameti ve Elastisite Modülü Değerleri	59
Çizelge 4.2: Epoksi Matrisine TiC Takviyesinin Eğilme Mukavemetine Etkisi	61
Çizelge 4.3: Epoksi Matrisine TiC Takviyesinin Eğilme Elastisite Modülüne Etkisi...	62

RESİMLER DİZİNİ

Sayfa

Resim 2.1: Balista	10
Resim 2.2: NIJ 0101.06 Koruma Seviyeleri	15
Resim 3.1: Aramid Esaslı Zırh Kumaşı	47
Resim 3.2: Ultrasonik Karıştırma Makinası	48
Resim 3.3: Sıcak Presleme Sonrasında Elde Edilen Plakalar	49
Resim 3.4: Çekme Testinde Kullanılan Numuneler	50
Resim 3.5: Çekme Test Cihazı.....	50
Resim 3.6: 3 Nokta Eğme Test Cihazı.....	51
Resim 3.7: Atış Düzeneği	52
Resim 4.1: 15 Katlı Saf Epoksi Reçineli Plakanın Atış Sonrası Ön ve Arka Yüzeyi....	64
Resim 4.2: 15 Kat Epoksisiz Aramid Plakanın Atış Sonrası Ön ve Arka Yüzeyi.....	65
Resim 4.3: 13 Katlı Saf Epoksi Reçineli Plakanın Atış Sonrası Ön ve Arka Yüzeyi....	65
Resim 4.4: 14 Katlı Saf Epoksi Reçineli Plakanın Atış Sonrası Ön ve Arka Yüzeyi....	66
Resim 4.5: 14 Katlı %3 TiC Katkılı Epoksi Reçineli Plakanın Atış Sonrası Ön ve Arka Yüzeyi.....	67
Resim 4.6: 13 Katlı %3 TiC Katkılı Epoksi Reçineli Plakanın Atış Sonrası Ön ve Arka Yüzeyi.....	68
Resim 4.7: 13 Katlı %5 TiC Katkılı Epoksi Reçineli Plakanın Atış Sonrası Ön ve Arka Yüzeyi.....	68
Resim 4.8: Aramid Plaka ve Reçine İçerisinde TiC Partiküllerinin Dağılımının Mikroskop Yardımıyla 200X Yakınlıkta Görüntülenmesi	69

1. GİRİŞ

İlk çağlarda doğal madenlerin işlenmesi ile başlayan malzeme bilimi günümüzde gelişen teknoloji sayesinde ve çağın gerektirdiği ihtiyaçların karşılanabilmesi için yürütülen çalışmaların neticesinde üstün özelliklere sahip malzemelerin kullanımına imkân sağlayan bir bilim dalı haline gelmiştir.

Söz konusu gelişmeler ile birlikte günümüzde kullanımı yaygınlaşan liflerle güçlendirilmiş polimer bazlı kompozitler, yüksek özgül sertlik ve mukavemetlerinin yanı sıra çevresel dayanıklılıkları sayesinde de çeşitli mühendislik uygulamalarında tercih edilmektedir. Çok farklı uygulama alanlarında kullanılan fiber kompozitler özellikle balistik alanındaki uygulamalarda kullanılan aramid lifleri sayesinde, yüksek tokluk ve hasar toleransı sağlayarak ileri kompozitlerin takviye elemanları olarak büyük bir öneme sahip olmaktadır. Yüksek mukavemetli kumaşlar yalnızca balistik uygulamalarda değil, aynı zamanda havacılık, denizcilik ve taşıt teknolojisi gibi çeşitli alanlarda da yaygın şekilde kullanılmaktadır (Usal 2020).

Askeri ve sivil korunma ihtiyaçlarının bir sonucu olarak ortaya çıkan balistik koruyucu giysiler, başlangıçta metal ve metal türevi malzemelerden yapılmış zırhların evriminden esinlenerek tasarlanarak üretilmiştir. Ancak, zamanla yüksek mukavemetli kumaşların üretilmesi ile söz konusu kumaşlardan yapılan koruyucu giysilerin kullanımı zamanla yaygınlaşarak eski nesil ağır zırhlar ve kişisel koruyucu donanımların yerini almıştır (Yumak 2014).

Teknolojik gelişmeye paralel olarak, son zamanlarda nanokompozitler de üstün özellikleri nedeniyle her alanda kullanılmaya başlanmıştır. Araştırmalarda çeşitli katkı maddelerinin ilave edilmesiyle, kompozit malzemenin katkısız kompozit malzemelere kıyasla fiziksel ve mekanik özelliklerinde iyileşmeler sağlandığı görülmektedir (Öner vd. 2017).

Nanokompozitlerin kullanım alanlarından birisi de balistik çözümlerler olarak karşımıza çıkmaktadır. Balistik ürün tasarımında en önemli kriter balistik koruma seviyesidir. Belirlenen koruma seviyesinde üretilecek üründe hafifliğin mümkün olduğu

kadar az olması rekabet unsuru yönünden önem arz ettiğinden yürütülen mühendislik çalışmaları ile geleneksel kompozit zırh kumaşlarının farklı çözümlemeler ile güçlendirilmesi ve nihayetinde nihai üründe hafiflik sağlanması hedeflenmektedir.

Bu tez çalışmasında da epoksi matrisli aramid zırh kumaşlarında matris malzemesi içerisine farklı karıştırma oranlarında takviye edilen TiC nanopartikülünün mekanik özellikler ve balistik performansa olan etkileri araştırılmıştır. Matris malzemesi içerisine takviye edilen TiC katkısının mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi maksadıyla yapılan çekme ve 3 nokta eğme testi ile optimum karıştırma oranının belirlenmesi amaçlanmıştır. Aramid takviyeli epoksi matrisli kompozit plakaların matris fazına optimum karıştırma oranları ile takviye edilecek TiC nanopartikülünün balistik performansta iyileştirme yapması ve aramid plakalarda katkısız numunelerin balistik sınırı olan kat sayısının altında nanopartikül takviyeli çözümler üreterek toplam ürün ağırlığında hafiflik sağlama hedeflenmiştir.

Bu tez çalışmasında elde edilecek sonuçlar ile nanopartikül takviyeli balistik ürün üretimi konusunda yürütülen çalışmalara ışık tutulması ve literatürde TiC nanopartikülünün balistik performansa etkisi noktasındaki araştırma eksikliğinin giderilmesi amaçlanmıştır.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Kompozit Malzeme Bilimi

Kullanışlı nesneler üretmek için doğal ya da yapay olarak elde edilen maddelere malzeme denir. Günümüzde, birçok farklı malzeme türü bulunmaktadır. Malzemeler türlerine göre seramik, metalik, polimer, kompozit, elastomer ve cam malzemeler olarak sınıflandırılabilir (Soy 2009).

Kompozit malzemeler, aslında "karışım" anlamına gelmesine rağmen çözücü ve çözünen bileşenlerden oluşmamaktadır. Bu malzemelerde bileşenler arasında atom alışverişi bulunmamaktadır. Geleneksel malzemelerde bulunmayan veya sınırlı olan bazı özellikleri geliştirmek amacıyla, birbiri içinde çözünemeyen ve farklı özelliklere sahip en az iki bileşenden oluşan malzemelere kompozit malzemeler denilmektedir. Kompozit bileşenleri kimyasal olarak birbirlerini etkilemezler ve genellikle insan eli ile tasarlanarak üretilirler. Eğer kompozit bileşenlerinin atom boyutu 300 nanometre altında ise, bu tür kompozitlere ise nanokompozit denilmektedir. Malzemeler birbiri içinde çözünürse, bu tür malzemeler kompozit değil alaşım olarak adlandırılır. Kompozit malzemelerde, yapıyı oluşturan bileşenlerin birbiri içinde çözünmeleri istenmemektedir. (Akbulut 2007, Şahin ve Akdoğan 2006)

Kompozit malzemeler, çeşitli form ve oranlarda bulunan takviye fazı ile bu malzemelerin çevresinde hacimsel olarak çoğunluğu oluşturan matris malzemedan oluşur. Takviye malzemesi, kompozit malzemenin mukavemetini ve yük taşıma kapasitesini artırırken, matris malzeme plastik deformasyona geçişte oluşabilecek çatlak ilerlemelerini önler ve kompozit malzemenin kopmasını geciktirir (Atmaca 2006).

Matris olarak kullanılan malzemenin bir diğer amacı da fiber malzemeleri yük altında bir arada tutmak ve yükü lifler arasında homojen olarak dağıtmaktır. Bu sayede fiber malzemelerde plastik deformasyon gerçekleştiğinde ortaya çıkabilecek çatlak ilerlemesinin önüne geçilmiş olur (Atmaca 2006).

Kompozit malzemelerin avantajı, bileşenlerinin en iyi özelliklerini bir araya getirmesidir. Kompozit malzemelerin üretimi ile aşağıdaki özelliklerin bir ya da birkaçının geliştirilmesi amaçlanır (Buytoz 1999).

- Mukavemetin artırılması
- Ağırlığın azaltılması
- Korozyon direncinin artırılması
- Termal ve elektriksel iletkenliğin kontrol edilmesi
- Dayanıklılığın artırılması
- Maliyet etkinliğinin sağlanması

2.1.1 Kompozit Malzeme Türleri

Kompozit malzemeler, kullanılan takviye elemanının şekline göre beş sınıfa ayrılabilir. Bu sınıflar partikül takviyeli, fiber takviyeli, levhasal, tabakalı ve doldurulmuş kompozit malzemelerdir (Soy 2009).

Partikül takviyeli kompozitler; matris içinde yer alan makroskobik veya mikroskobik partiküllerle oluşturulan malzemelerdir. Bu partiküllerin ortalama boyutu genellikle 1 mm'den büyük olup, takviye malzemelerinin hacim oranı genellikle %50'nin altında tutulur (Kurnaz 1993). Partikül takviyeli kompozitlerde, partiküllerin matris içinde homojen olarak dağılması malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirir ve bu tür kompozitler genellikle aşınma direnci, sertlik ve ısı direnci gibi özelliklerin geliştirilmesi amacıyla kullanılır.

Fiber takviyeli kompozitler; matris, kompozite gelen yükü fiberlere iletir ve yükün büyük bir kısmı fiberler tarafından taşınır. Bu nedenle, fiber takviyeli kompozitlerin özellikleri yani yönlendirmeye bağlı olarak değişir. Fiberler, örgülü, şerit fitil veya tabakalar halinde yönlü olarak kullanılabilir (Akbulut 1994). Fiber takviyeli kompozitlerin avantajı, yüksek mukavemet ve sertlik sağlamalarıdır. Ayrıca, hafif olmaları nedeniyle havacılık, otomotiv ve spor ekipmanları gibi çeşitli uygulamalarda tercih edilirler.

Levhasal kompozitler; matris fazı içinde levha şeklindeki takviye elemanlarından oluşur. Bu levhalar, Al-grafit sistemlerinde olduğu gibi, pullar, cam, mika veya metal olabilir.

Levhasal kompozitler, yüksek mukavemet ve ısı direnci sağlayarak genellikle elektronik ve yapısal uygulamalarda kullanılır. Bu tür kompozitler, özellikle mekanik ve termal özelliklerin optimize edilmesi gereken alanlarda tercih edilir (Soy 2009).

Tabakalı kompozitler ise değişik özelliklere sahip plakaların üst üste konmasıyla oluşturulur. En az iki malzemeden oluşan tabakalı kompozitlerde tabakalar farklı olabileceği gibi aynı malzemeden de olabilmektedir. Bu kompozitler genellikle matris içinde rasgele yönlendirilmiş veya tek yönlü, hatta çift yönlü fiber takviyeli tabakalardan meydana gelir. Bu tip yapı, farklı bileşenlerin katmanlar halinde bir araya getirilmesiyle üretilir. Yönlendirilmiş fiber takviyeli tabakalar, genellikle matris içinde düzenli veya rastgele yönlendirilmiş liflerin bir araya getirilmesiyle oluşur (Şahin ve Akdoğan 2006).

Doldurulmuş kompozitler; takviye malzemesi formunun sürekli bir iskelet yapısına sahip olduğu ve bu formun matris bir malzeme ile doldurulmasıyla elde edilen kompozitlerdir. Matris malzemesinin daha önceden hazırlanmış bir preform (köpük) yapısına basınçlı, basınçsız veya döküm yoluyla emdirilmesiyle üretilirler (Akbulut 1994; Altınkök 2002).

Kompozit malzemeler matris malzemesinin cinsine göre de genellikle polimer matrisli kompozitler, metal matrisli kompozitler, seramik matrisli kompozitler, karbon/karbon kompozitler ve nano kompozit malzemeler olarak beş ana sınıfa ayrılır (Soy 2009). Söz konusu kompozit malzeme sınıflarından en yaygın olarak karşımıza çıkanları ise seramik matris kompozitler, metal matris kompozitler ve polimer matris kompozitlerdir.

2.1.1.1 Seramik Matris Kompozitleri

Seramik matris kompozitler (SMK), genellikle çok sert ve kırılgan seramik malzemelerin matris olarak kullanıldığı ve yüksek sıcaklık dayanımına sahip oldukları kompozitlerdir. Bu malzemeler, Al_2O_3 , SiC, Si_3N_4 , B_4C , TiC, TiB_2 , TiN ve AlN gibi bileşikler içerir ve çeşitli yapısal yapılar elde etmek için amaçlarına bağlı olarak bir araya getirilir. Özellikle sandviç zırhlar, askeri parçaların çeşitli imalatı ve uzay araçları gibi alanlarda yaygın olarak kullanılırlar. Seramik matris kompozitlerin özellikleri, karbon, seramik ve cam lifler gibi yüksek sıcaklık uygulamaları gibi özel koşullar için geliştirilmiş katkı maddeleriyle iyileştirilebilir. Seramik fiberlerle takviye edildiğinde, bu kompozitlerin

dayanıklılığı artar. Son yıllarda, alümina ve zirkonya esaslı seramik kompozitler üzerinde yapılan araştırmalar, bu malzemelerin sadece roket başlıkları ve uzay araçları gibi endüstriyel uygulamalarda değil, aynı zamanda biyomalzeme olarak da insan vücudunda kullanılmasına olanak tanımıştır (Ünal 2005, Akbulut 1994, Gültekin 2007).

2.1.1.2 Metal Matris Kompozitleri

Metal matris kompozitler (MMK), genellikle ana yapıyı matris metalin oluşturduğu ve takviye elemanı olarak çoğunlukla seramik bir takviye fazının kullanıldığı kompozitlerdir. Bu malzemelerin seçiminde büyük ölçüde esneklik bulunmaktadır. Araştırmalar, son 45-50 yıl boyunca MMK'lerle ilgili geniş kapsamlı bir araştırma ve literatürde olumlu bir yer edindiğini göstermektedir. MMK'ler, geleneksel malzemelere güçlü bir alternatif sunmaktadır. Seramiklerin yüksek elastik modülüyle metallerin plastik deformasyon özellikleri birleştirilerek, aşınmaya dayanıklı, kırılma tokluğu ve basma gerilmesi yüksek malzemeler elde edilmektedir. Bu kompozitler, genellikle otomotiv, havacılık ve savunma sanayisinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Çalın 2006, Akbulut 1994, Altınkök 2002).

2.1.1.3 Polimer Matris Kompozitleri

Polimer matris kompozitler (PMK) genellikle sürekli fiber takviyeli ve termoset ile termoplastik polimerler olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Bu kompozitler arasında, sürekli fiberlerle takviye edilmiş polyester ve epoksi reçine matrisli olanlar öne çıkar. Cam fiber, kevlar fiber ve karbon fiberler gibi çeşitli takviye malzemeleri kullanılır. PMK'lerin üretiminde yaygın olarak kullanılan yöntemler arasında el yatırması, vakum infüzyon, açık kalıplama, reçine transfer kalıplama, filament sarma, pultrüzyon ve enjeksiyon yöntemleri bulunur. Bu kompozitlerin yaygın kullanım alanları arasında korozyon direnci nedeniyle denizcilik uygulamaları, hafiflikleri dolayısıyla otomotiv ve diğer taşımacılık endüstrileri, spor ekipmanları ve yanmazlık gerektiren otomotiv iç dekorasyonu yer alır (Ögel 1997, Toptan vd. 2006, Akbulut 1994).

2.1.2 Polimer Matrisli Kompozit Üretim Yöntemleri

Farklı elyaf tipleri için uygun olan çeşitli matris tipleri bulunmaktadır ve bu elyaflarla birlikte reçine malzemeleriyle üretim yapmak için çeşitli teknikler mevcuttur.

Uygulamada, mukavemet, yüzey kalitesi, elyaf/reçine oranı gibi gereksinimlere göre farklı teknikler tercih edilir. Bu imalat yöntemlerinde izlenen süreç genel olarak reçine kürleme döngüsüne dayanmaktadır (Üstün 2020).

2.1.2.1 El Yatırma Yöntemi

Kompozit üretim yöntemleri arasında en basit ve geleneksel olanı el yatırma yöntemidir. Bu yöntemde istifleme sırasında kuru kumaş katmanlarına fırça, rulo vb. basit el aletleri ile tek tek reçine emdirilmesidir. Katmanlar istenilen boyutlarda kesilir, kumaşlara reçine emdirilir ve ıslak katmanlar üst üste istiflenir. İşlem tamamlandıktan bir süre sonra reçinenin kürlenmesi tamamlanır. Bazı yöntemlerde ise oda şartlarında kürleme yerine belirli bir basınç altında kürleme işlemi de yapılabilmektedir (Üstün 2020).

2.1.2.2 Vakum İnfüzyon Yöntemi

Bir diğer üretim tekniği olan vakum infüzyon yönteminde ise tek tek serilen kuru kumaşlar veya katmanlara reçine uygulamasının vakum yardımıyla gerçekleştirilir. Kumaşlar istiflendikten sonra vakum poşeti ile kapatılır ve sistemde bulunan iki boru ile reçine emdirilmesi gerçekleştirilir. Borulardan biri biri sistemdeki havayı çeken bir makineye, diğeri ise reçine deposuna bağlıdır ve reçine kumaşlara uygulanır. Uygulama yapıldıktan sonra kürleme işlemi başlar (Üstün 2020).

2.1.2.3 Açık Kalıplama Yöntemi

Açık kalıplama yöntemi, tek tarafı kalıpla yapılan, ekonomik ve hızlı bir imalat tekniğidir. Özellikle otomotiv endüstrisinde araç parçaları için (çoğunlukla dış parçalar) sıklıkla kullanılır. Bu yöntemin en yaygın türlerinden biri "Püskürtme Yöntemi"dir (Üstün 2020).

Yöntemde, reçine ve elyaflar farklı kaplardan alınarak püskürtme tabancasının ucunda birleştirilir. Uygulamadan önce kalıbın iç kısmına seperatör uygulanır. İhtiyaca göre, elyaf ve reçine öncesi jelkot uygulanabilir ve jelkot kürlenirken, kalıp içerisine reçine ve katkı maddeleri püskürtülür. Reçine kürledikten sonra parça kalıptan ayrılır ve imalat tamamlanır. Uygulamalarda genellikle takviye olarak kırılmış cam elyaf, matris olarak ise polyester reçine tercih edilir. Teknik, maliyet ve zaman avantajı nedeniyle yüksek mukavemetin gerekli olmadığı birçok uygulamada tercih edilmektedir (Üstün 2020).

2.1.2.4 Reçine Transfer Kalıplama Yöntemi

Sürekli fiberlerle nispeten karmaşık geometriler üretmek için reçine transfer kalıplama (RTM) yöntemi kullanılabilir. Bu yöntem, açık kalıplama ile farklı olarak iki tarafı kapalı bir kalıp kullanır. Kalıbın içi, kompozit parçanın istenilen geometrisine göre işlenir. Kalıp malzemesi olarak genellikle metal tercih edilir, çünkü kalıbın işlenmesi için talaşlı imalat işlemine ihtiyaç duyulur (Üstün 2020).

RTM yönteminde, kuru kumaşlar kalıba yerleştirilir ve ardından kalıbın iki tarafı kapatılır. Reçine, kalıp parçalarının üst ve alt taraflarına yerleştirilen borular aracılığıyla aktarılır ve basınç ayarlandıktan sonra kürlleme işlemi gerçekleşir. Bu yöntemde reçine akışı hayati önem taşır, bu nedenle genellikle düşük viskoziteli reçine malzemeleri tercih edilir. Yüksek viskoziteli reçineler, fiberler ve reçine arasında istenen yapışma bağına sağlamak için yeterli olmayabilir, bu da kompozit malzemenin mekanik özelliklerinde önemli bir düşüşe neden olabilir. RTM yöntemi, mukavemeti ve yüzey kalitesi yüksek parçalar elde edilmesini sağlar. Ayrıca, yüksek basınç ve sıcaklıklara ihtiyaç duyulmadığından dolayı otoklav yöntemine göre daha ekonomiktir (Üstün 2020).

2.1.2.5 Prepreg Yöntemi

Prepreg, üzerine reçine emprenye edilmiş kumaşlar kullanılarak yapılan bir imalat yöntemidir. Bu yöntemle, mukavemeti yüksek, yüzey kalitesi yüksek ve fiber hacim içeriği yüksek kompozit yapılar elde edilebilir. Reçine emdirilmiş kumaşlar üst üste istiflenir ve yüksek basınç ve sıcaklık altında kürlleme işlemi uygulanır (Üstün 2020).

Yüksek basınç ve sıcaklık için iki temel seçenek vardır. Bunlardan biri "sıcak pres" yöntemidir. Bu yöntemde istiflenen kumaşlar preslenir ve aynı anda ısı uygulanır. Diğer seçenek ise "otoklav" yöntemidir. Bu yöntemde, sıcak presle benzer şekilde yüksek sıcaklık ve basınç uygulanırken, aynı zamanda kumaşlar vakum poşeti ile kapatılır. Otoklav yönteminde yüzey kalitesi daha iyi olup, elyaf hacim oranı sıcak presle yaklaşık %3-4 daha yüksek olabilmektedir (Üstün 2020). Ancak, özel ekipmanlar gerektiği için otoklav yöntemi, sıcak presle karşılaştırıldığında daha maliyetli bir çözüm haline gelir

Prepreg yöntemi, kompozit kumaşların özel koşullarda saklanması gerektiğinden maliyete duyarlı uygulamalar için uygun değildir. Reçinenin oda sıcaklığında kürlenmesini önlemek amacıyla depolama için buzdolapları kullanılır, bu da üretim ekipmanı ve teknik maliyetini artırır.

2.1.2.6 Filament Sarma Yöntemi

Filament sarma yöntemi, sürekli fiber takviyeli silindirik kompozit yapıların üretiminde sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem, endüstride kompozit boru ve yüksek basınçlı kap imalatında tercih edilir. Üretim sürecinde, yatay olarak yerleştirilen bir mandrel dönmektedir. Mandrelin dönüşü sırasında reçine banyosunda emdirilen filamentler (takviye) makinenin ucundaki aparat ile mandrel üzerine sarılır. Bu aparat, dönebilen bir yapıya sahiptir, böylece sarım açısı ihtiyaca göre ayarlanabilir (Üstün 2020).

Son on yılda, gaz ve sıvı taşımada kullanılan metal boruların korozyon sorunu nedeniyle, korozyona karşı direnci yüksek ve uzun ömürlü olmaları sebebiyle kompozit borular popüler hale gelmiştir. Bu boruların imalatı genellikle maliyet avantajı nedeniyle cam elyaf takviyeleri kullanılarak gerçekleştirilir. Ayrıca, havacılık uygulamaları için yüksek mukavemetli karbon fiber takviyeli yüksek basınçlı kaplar da bu yöntemle üretilmektedir (Üstün 2020).

2.1.2.7 Pultrüzyon ve Ekstrüzyon Yöntemleri

Sabit kesitli kompozitlerin üretiminde genellikle pultrüzyon ve ekstrüzyon teknikleri kullanılır. Pultrüzyon yönteminde, sürekli lifler kaynaktan bir gerilimle reçine banyosuna alınır. Reçine emdirme işleminden sonra lifler, iç kısmı istenilen geometriye göre işlenen bir kalıba çekilir. Reçine kürlenmesini sağlamak için reçine emdirilmiş fiberlere ısı uygulanır. Kompozit yapı kürlendikten sonra kalıptan çıkarılır ve dışarıdaki kesme cihazı ile istenilen ebatta kesilebilir (Üstün 2020).

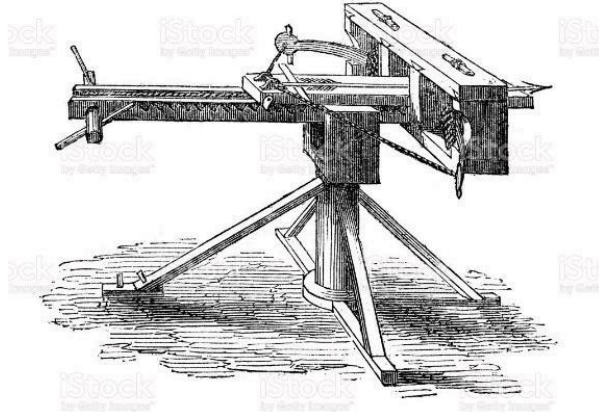
Ekstrüzyon yönteminde, pultrüzyondan farklı olarak malzemeler çekilmez, itilir. Kalıbın içinde büyük bir vida bulunur ve kalıp kalıba bağlanır. Kalıp üzerinde kompozit bileşenlerin depolandığı ve kalıba alındığı bir tank bulunmaktadır. Kalıp içerisinde

termoplastik malzemelere ısı uygulanır. Vidanın dönmesi sayesinde malzemeler kalıba doğru hareket eder. Isı nedeniyle termoplastik malzemeler yumuşar ve kalıp içerisinde soğutma işlemi gerçekleşir. Kurlenme sonrasında kalıptan çıkarılan termoplastik kompozitler, kesme cihazı ile istenilen ebatta kesilir (Üstün 2020).

2.2 Balistik Bilimi ve Balistik Türleri

Balistik kelimesi, bir merminin namludan çıkıp hedefe ulaşmasına kadar geçen süreçte, çevresel faktörlerin etkisiyle değişen hareketlerini, hedefe çarpma sonrası enerjinin absorbe edilmesini ve meydana gelen deformasyonları inceleyen bir bilim dalını ifade eder (Sözen 2016).

"Balistik" terimi, Orta Çağ savaşlarında kullanılan "Balista" adı verilen mancınık sistemlerinden türemiştir. Yunanca "ballistra" kelimesinden türetilmiş Balista, düşman yapıları ve savunmalarını yıkmak için büyük taşlar, oklar vb. cisimlerin fırlatıldığı bir silahtır (Resim 2.1). Bu sistemle atılan cisimlerin hedefe olan hareketlerinin belirlenmesi için yapılan hesaplamalar günümüz balistik bilimlerinin temelini oluşturmuştur (Üstün 2020).



Resim 2.1: Balista (Üstün 2020)

Balistik bilimi, 1800'lerde temelleri atılmış ve 20. yüzyıl başlarında bir bilim dalı olarak ortaya çıkmıştır. 1835'te Henry Goddard, bir suçun çözümünde mermi çekirdeklerini karşılaştırarak katilin yakalanmasını sağlamıştır ve böylece adli balistik bilimi kullanılmaya başlanmıştır. 1900'lerin başlarında, mermi çekirdekleri ve mermi kovanlarının atıldığı silahla ilişkilendirilmesi sağlanmıştır. 1925'te New York'ta mermi

kovanı karşılaştırmalarında mukayese mikroskobu kullanılmaya başlanmış ve günümüzde de bu yöntem devam etmektedir. Daha sonra namlu içindeki setlerin kıvrımlarını ölçen Helixometer geliştirilmiştir (Çelikel 2008). II. Dünya Savaşı'ndan sonraki yıllarda ise bilgisayar programları yardımıyla karmaşık matematiksel problemlerin daha doğru çözülmesini sağlanmıştır (Özer 2008).

Balistik incelemeler, merminin namlu içinde, havada ve hedefteki davranışlarını kapsar. Bu doğrultuda balistik üç ana kategoriye ayrılır:

- İç Balistik
- Dış Balistik
- Terminal Balistik (Üstün 2020)

2.2.1 İç Balistik

İç balistik, ateşlemenin başlamasından merminin silah namlusunu terk etmesine kadar geçen süre içindeki olayları kapsamaktadır. İç balistik biliminde itici gaz basıncı, ivme, merminin çıkış hızı ve silahın ateşleme iğnesinin geri tepmesi gibi parametreler inceler ve merminin namludan çıkışına kadar gerçekleşen süreçte bu faktörler büyük önem taşımaktadır (Üstün 2020, Çelikel 2008).

Ateşleme iğnesi, kapsüle çarptığında kapsül içerisindeki bileşenler patlayarak yüksek sıcaklık oluşturur. Bu patlama sonucu oluşan alev, barut tozuna ulaşır ve yüksek sıcaklık nedeniyle toz yanmaya başlar. Bu yanma işlemi sırasında yüksek basınçlı gaz oluşur. Namlu duvarlarından dışarı çıkamayan bu gaz, mermiyi ileri doğru iterek merminin namludan çıkmasını sağlar (Üstün 2020).

2.2.2 Dış Balistik

Dış balistik, merminin namludan çıktıktan sonra havadaki hareketini ve hedefe ulaşana kadar gösterdiği davranışları inceleyen bir balistik dalıdır. Mermi, uçuş esnasında namlu içindeki gibi kısıtlayıcı faktörlerden etkilenmez ve serbest bir cisim gibi davranır. Bu nedenle merminin hareketi, namlu içindeki hareketinden çok daha karmaşık hale gelir ve merminin yaklaşık rotasını belirlemek için ayrıntılı matematiksel hesaplamalar gerektirir (Üstün 2020).

Merminin uçuş sırasındaki davranışını temel olarak iki hava direnci ve yer çekimi olmak üzere iki faktör etkilemektedir. Bu iki parametre, merminin havada yavaşlamasına ve aşağı doğru hareket etmesine sebep olmaktadır (Heard 2008). Dış balistik hesaplamalarında, mermiyi vakumlu bir ortamda bir nokta olarak kabul etmek en basit durumdur; bu durumda merminin hareketini etkileyen tek faktör yer çekimidir. Ancak, gerçek dünyada merminin geometrisi ve hava direnci gibi ek faktörler dikkate alınmalıdır. Merminin geometrisi, hava direncini doğrudan etkiler ve bu direnç, merminin uçuş yolunu ve hızını belirlemektedir (Üstün 2020).

Dış balistik bilim dalında merminin hedefe ulaşana kadar geçen süredeki hareketini doğru bir şekilde hesaplamak için;

- Yer çekiminin etkisi,
- Namlu çıkış hızı,
- Namlu açısı,
- Merminin geometrisi,
- Mermi çapının ağırlığa oranı parametrelerine ihtiyaç duyulmaktadır (Üstün 2020).

2.2.3 Terminal Balistiği

Terminal balistik, bir mermi veya parçacığın katı veya sıvı bir hedefe nüfuz etme davranışının incelenmesidir (Heard 2008). Bu alan, balistik biliminin merminin hedefe çarptığı andaki davranışını ve merminin hedefe olan etkisini araştırır. Terminal balistik genellikle penetrasyon potansiyeli ve yara balistiği olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır (Üstün 2020).

Penetrasyon potansiyeli, merminin duvarı, zırhı veya diğer koruyucu yapılar gibi farklı türdeki hedef malzemelere nüfuz etme yeteneğini incelemektedir. Yara balistiği ise, merminin canlı doku üzerindeki etkisini inceler. Bu bilim dalında merminin vücuda girdiği noktadan itibaren nasıl bir hasar oluşturduğunu ve iç organlara ne tür etkilerde bulunduğunu araştırılır. Bu, genellikle tıbbi alanlarda, yaralanma biçimlerini ve tedavi yöntemlerini anlamak için önemlidir (Üstün 2020, Heard 2008).

2.2.3.1 Yara Balistiği

Yara balistiği, bir mermi veya parçacığın canlı dokular üzerindeki etkisini ve sonuçlarını araştırmaktadır. Bu etki sürecinde, merminin kinetik enerjisinin absorbe edilmesi için üç temel mekanizma devreye girmektedir. Bu mekanizmalar; yırtılma ve ezilme, şok dalgaları ve kavitasyon olarak sıralanmaktadır. Canlı bir dokuya nüfuz etme eşiği genellikle 40-60 m/s civarında olduğundan mermilerin genellikle namludan çıkış hızı olan 700-800 m/s hızlar dikkate alındığında canlı dokuya nüfuz etmesinde bir zorluk yaşanmamaktadır (Üstün 2020).

Merminin dokuyu delmesi başladığında, kinetik enerji şok dalgaları tarafından komşu dokulara iletilir ve bu dokuların hareketi nedeniyle geçici bir boşluk oluşur. Bu geçici boşluğun çapı genellikle mermi çekirdeğinin çapından daha büyüktür, ancak dokuların elastik özellikleri nedeniyle bu boşluk eski haline dönecek ve iyileşecektir. Geçici boşluk genellikle kısa ömürlüdür ve penetrasyonun başladığı bölgeden başlayarak yavaşça daralır. Kinetik enerjinin azalmasıyla birlikte, boşluğun çapı sabit hale gelir. Ayrıca, merminin kendi tahribatına bağlı olarak delme sırasında kalıcı bir oyuk da oluşabilir (Heard 2008).

Bu boşlukların çapı, merminin geometrisine, ağırlığına ve genişliğine bağlıdır. Aşırı hızlı mermi atıldığında, dokular patlayıcı bir şekilde komşu dokulara doğru hareket edebilir ve devasa geçici boşluklar oluşabilir. Bu durumda, boşlukların büyüklüğü, hayati dokuların veya kemiklerin zarar görebileceği kadar büyük olabilir. Ayrıca, penetrasyon başladığında ve kinetik enerji aktarıldığında, girişteki komşu dokuların boşluğa doğru yayılma eğilimi göstermesine "geri sıçrama" denir (Üstün 2020).

2.2.3.2 Penetrasyon Potansiyeli

Farklı malzeme türlerinin penetrasyon özellikleri, atış olaylarının incelenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Geçmişte, bir mermi veya parçacığın delme performansını değerlendirmek için farklı kalınlıklardaki çam tahtalara atış yapılmıyordu. Ancak bu yöntemde nem, budak içeriği ve ahşabın yaş gibi faktörler, sonuçların doğruluğunu etkileyebilir ve düşük hassasiyetli sonuçlara neden olabilir (Heard 2008).

Günümüzde ise bir mermi veya parçacığın performansını değerlendirmek için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bunlardan biri, canlı dokuya nüfuz hızlarının karşılaştırılmasıdır. Diğer ise mermilerin çelik malzemelere nüfuz derinliğinin incelenmesidir. Mermilerin hedef malzemeler üzerindeki etkisi, kalibre ve kullanılan mühimmat türüne bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Hedef malzemelerin enerji emilim mekanizmaları, kullanılan malzemenin türüne bağlı olarak farklılık gösterir. Zırh sistemlerinde genellikle çelik, seramik ve fiber takviyeli polimerler malzemeler tercih edilmektedir (Üstün 2020).

2.3 Balistikte Çözümlere Etki Eden Faktörler

Balistik ürün üretiminde elde edilen nihai ürünün performansını etkileyen farklı parametreler söz konusudur. Mermi hızı, geometrisi, geliş açısı vb. tehdit kaynaklı faktörler olduğu gibi üretim esnasında seçilen malzemelerin özellikleri de nihai ürün performansında oldukça önemlidir.

Hedef balistiğinin incelemiş olduğu hedef üzerindeki merminin etkileri, tehdit seviyesine göre farklılık göstermektedir. Bazı durumlarda balistik çözüm olarak en basitinden tabanca mermisine karşı koruma sağlamak gerekirken bazı durumda da zırh delici mermilere karşı hedef üzerinde tahribatın minimum olmasını sağlamak gerekmektedir.

Balistik korumalarda tehdit seviyesine göre koruma seviyelerinin belirlendiği ve dünyada birçok ülke tarafından yazılan çok farklı standartlar arasında Amerika Birleşik Devletleri Ulusal Adalet Enstitüsü tarafından hazırlanan NIJ 0101.06 standartı günümüzde birçok dünya ülkesi tarafından balistik uygulamalarında uluslararası referans dokümanı olarak kabul görmekte ve kullanılmaktadır. Resim 2.2’de söz konusu standartta yer alan koruma seviyeleri ve koruma seviyelerine karşılık gelen tehditler gösterilmektedir. Balistik ürün tasarımında son kullanıcının talep etmiş olduğu koruma seviyesinde balistik koruyucu ürün üretilirken söz konusu standartta yer alan mermi cinsleri ve hız değerleri ile yapılan balistik testlerde başarı elde edilmek maksadıyla ürün konfigürasyonu belirlenmektedir.

ARMOR TYPE	WEAPON	TEST AMMUNITION	NOMINAL BULLET MASS	SUGGESTED BARREL LENGTH	REQUIRED BULLET VELOCITY	REQUIRED HITS PER ARMOR SPECIMEN
I		22 LRHV Lead 38 Special RN Lead	2.6 g 40 gr 10.2 g 158 gr	15 to 16.5 cm 6 to 6.5 in 15 to 16.5 cm 6 to 6.5 in	320 ± 12 m/s 1050 ± 40 ft/s 259 ± 15 m/s 850 ± 50 ft/s	5 5
II-A		357 Magnum JSP 9 mm FMJ	10.2 g 158 gr 8.0 g 124 gr	10 to 12 cm 4 to 4.75 in 10 to 12 cm 4 to 4.75 in	381 ± 15 m/s 1250 ± 50 ft/s 332 ± 12 m/s 1090 ± 40 ft/s	5 5
II		357 Magnum JSP 9 mm FMJ	10.2 g 158 gr 8.0 g 124 gr	15 to 16.5 cm 6 to 6.5 in 10 to 12 cm 4 to 4.75 in	425 ± 15 m/s 1395 ± 50 ft/s 358 ± 12 m/s 1175 ± 40 ft/s	5 5
III-A		44 Magnum Lead SWC Gas Checked 9 mm FMJ	15.55 g 240 gr 8.0 g 124 gr	14 to 16 cm 5.5 to 6.25 in 24 to 26 cm 9.5 to 10.25 in	426 ± 15 m/s 1400 ± 50 ft/s 426 ± 15 m/s 1400 ± 50 ft/s	5 5
III		7.62 mm 308 Winchester FMJ	9.7 g 150 gr	56 cm 22 in	838 ± 15 m/s	5
IV		30-06 AP	10.8 g 166 gr	56 cm 22 in	838 ± 15 m/s 2850 ± 50 ft/s	1

Resim 2.2: NIJ 0101.06 Koruma Seviyeleri

Balistik koruyucu giysilerin mekanik özelliklerini belirleyen ana faktörler arasında yüksek mukavemet, yüksek elastisite modülü ve düşük yoğunluk yer almaktadır. Bu özellikler, balistik uygulamalarda kullanılan kompozit malzemelerin birleşimiyle başarılı bir şekilde sağlanmaktadır ve yapılan araştırmalar ile her zaman ürün performanslarında iyileştirme yapılması hedeflenmektedir (Yumak 2014).

Balistik çözümlerde kullanılan malzemelerde aranan özellikler genel olarak yüksek çekme gerilmesi ve buna bağlı olarak yüksek elastikiye modülü değerlerine sahip olmasıdır. Çünkü malzeme her ne kadar elastikliğe sahip olursa merminin yüksek darbe etkisini o derece sönümlene imkânına sahip olacaktır.

Ayrıca malzeme seçiminde tehdit seviyesi de önemli bir yere sahiptir. Örneğin çelik çekirdeklere sahip zırh delici mühimmatlarına karşı koruma sağlaması maksadıyla üretilen balistik koruyucu plakalarda çelik çekirdeğin enerjisini absorbe etmek üzere yüksek sertlik ve iyi tokluk değerlerine sahip malzemelerden üretilmiş ön bir yüzey kullanılmaktadır.

Balistik ürün tasarımını etkileyen bir diğer faktör ise çevresel şartlardır. Üretilecek olan balistik ürünün hangi çevre koşullarına maruz kalacağı, hangi şartlar altında kullanımının olacağı gibi etkenler balistik ürün üretiminde malzeme seçimini doğrudan etkilemektedir. Tüm bunlardan bağımsız olarak, balistik ürün üretimi rekabetin olduğu bir sektör olması sebebiyle ağırlık ve maliyet gibi faktörler de balistik ürün tasarımını doğrudan etkileyen parametrelerdir.

2.4 Balistikte Kullanılan Polimer Matris Kompozitleri

Balistik ürün üretiminde maruz kalınan tehdit seviyesine göre farklı çözümler olmakla birlikte geçmiş yıllarda ağırlıklı olarak metal ve türevleri kullanılmaktaydı. Ağırlığından dolayı tercih edilmemeye başlanan metallerin yerini gelişen teknoloji ile birlikte yüksek mukavemetli polimer fiberler ve polimer kompozitler almıştır.

Balistik uygulamalarda kullanılan yüksek mukavemetli lifler tek başlarına kullanıldıklarında bir etkiye sahip olamayacağından, lifler iplikleri, iplikler örgüleri, örgüler ise kumaşları oluşturarak yüksek performans elde edilmektedir (Powell vd. 2009).

Balistik alanda kullanılan kumaşlar çözümlerde örgü ve dokuma kumaşlar olarak iki farklı tipte çıkmaktadır. Örgü kumaşların dokuma kumaşlara göre daha üstün özellikler göstermesine rağmen karmaşık üretim yöntemleri ve maliyetleri rekabet edilebilirliğini azaltmaktadır ve dokuma kumaşların kullanımı yaygınlaştırmaktadır (Wall 2002).

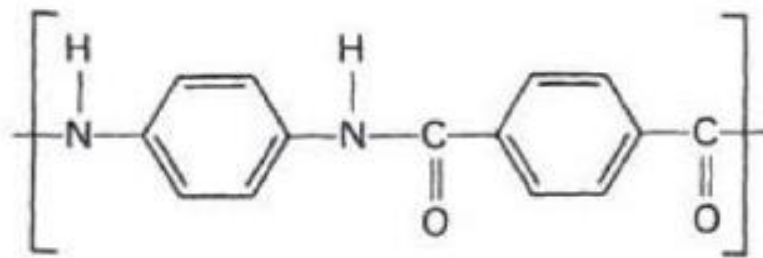
Balistik ürün üretiminde kullanılan yüksek mukavemetli fiberlerden elde edilen kumaşların hafif olmaları, ağırlıklarına oranla performanslarının oldukça yüksek olması ve kullanıcının hareket kabiliyetini kısıtlamayacak nitelikte olması metal ve seramiklere oranla daha fazla tercih edilmesinin başlıca sebepleridir (Sözen 2016).

Ancak, UHMWPE elyafının bahse konu avantajlarının yanı sıra en bilinen dezavantajı, mekanik özelliklerinin sıcaklıktan önemli ölçüde etkilenmesidir. Sıcaklık arttıkça, malzemenin mekanik özellikleri düşer çünkü erime ve camsı geçiş sıcaklığı düşüktür (Üstün 2020).

2.4.1 Aramid Esaslı Balistik Zırh Kumaşı

Aramid kelimesi bir çeşit naylon olan aromatik poliamid maddesinden gelmektedir. Aramid lifleri yüksek mukavemete sahip sentezlenen ilk organik liflerdir. Aramid fiber, iki aromatik halka arasında en az %85 oranında amid bağı içeren bir lif türüdür. Aramid fiberleri 1960'ların son yıllarında piyasaya sürülmeye başlanmıştır. Bunlardan en çok ticari olarak bilinen DuPont markasına ait Kevlar ve Teijin'e ait Twaron'dur (Prashant vd. 2017)

Balistik zırh kumaşları arasında yer alan aramid kumaşların üretiminde kullanılan aramid fiberler, "aromatik poliamid"den türemiştir ve kimyasal olarak "poli para fenilen terepitemid" olarak tanımlanmaktadır. Bu nedenle "para-aramid" olarak da karşımıza çıkmaktadır. Genel olarak aramid fiber meta aramid ve para aramid olmak üzere iki gruba ayrılır. Üretim sürecine bağlı olarak balistik özellik yerine daha çok yüksek ısı mukavemeti istenilen ve tutuşmanın istenmediği durumlarda tercih edilen meta-aramid kumaşlar da üretilebilmektedir (Sözen vd. 2016). Aramid türü kimyasal bağın konumuna bağlıdır. Para aramidlerde lifin uzun yönünde hizalanmış bağlara sahipken meta aramidler, zikzak deseninde bağlara sahiptir. Bağ yönünün ve türünün farklı olmasından dolayı para aramidler daha yüksek mukavemete sahiptir. Aramid fiberler iplik ve dokuma kumaş şeklinde ticari olarak kullanılmaktadır (Prashanth vd 2017).



Şekil 2.1: Para-Aramid'in Kimyasal Yapısı (Prashanth vd. 2017)

Aramid elyaflar, endüstride genellikle halat ve ağ imalatında tercih edilen yüksek mukavemetli elyaflar olarak tanımlanırlar. Özellikle halat ve ağ imalatında tercih edilmelerinin yanı sıra, kırılma tokluğunun yüksek olması aramidlerin yüksek enerji absorbe etme kapasitesine sahip olmasını sağlar. Bu özellik, aramid elyaflarını balistik

uygulamalar için uygun hale getirir (Üstün 2020). Diğer taraftan aramid fiberleri üstün mekanik özellikler ve fiziksel dayanımlarından kaynaklı olarak otomotiv sanayi, motor sporlarında kişisel koruyucu elbise üretimi, hava araçlarının gövde parçaları, tekne gövdeleri vb. birçok sektörde de yaygın olarak kullanılmaktadır (Karahan 2008).

Çizelge 2.1’de yer alan üstün fiziksel özellikleri ile yüksek balistik özellik gösterebilmektedirler. Ancak, yüksek mukavemetlerinin yanı sıra su ve yağa karşı olan hassasiyeti ile ultraviyole ışınlarına maruz kalması sonucunda balistik performansında düşüş yaşanması aramid kumaşların dezavantajları arasında yer almaktadır (Sözen 2016).

Çizelge 2.1: Kevlar Kumaşın Fiziksel Özellikleri (Afshari 2011)

Fiziksel Özellikler	Değer
Yoğunluk (g/cm ³)	1,45
Young Modülü (GPa)	1300
Çekme Modülü (g/denye)	1100
Çekme Dayanımı (GPa)	3,6
Elektriksel İletkenlik (mohm-m)	1015
Isıl İletkenlik (W/mK)	0,04-0,08
Erime Noktası (°C)	460°C'de ayrışır
Basınç Dayanımı (MPa)	393

Cam ve karbon elyaflara göre daha düşük yoğunluğa sahip olan aramid elyaflar yüksek kırılma tokluğu ve elastikiyet özellikleri sayesinde darbe yüklerine karşı yüksek direnç gösterirler (Üstün 2020).

2.4.2 Ultra Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen Esaslı Balistik Zırh Kumaşı

Balistik uygulamalarda kullanılan fiberler arasında en geniş kullanım alanına sahip olan fiberlerden birisi Ultra Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen (ing. Ultra High Molecular Weight Polyethylene- UHMWPE) fiberleridir.

Bu polimer esaslı fiberler, günlük hayatta yaygın olarak kullanılan polietilen ile aynı özelliklere sahip değildir. Polietilen polimerleri, milyonlarca molekül ağırlığına sahip

oldukları için bu tür fiberler, Ultra Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen olarak adlandırılmaktadır

Yüksek molekül ağırlığı, balistik ürün üretiminde kullanılmak için uygun olan UHMWPE fiberlerin, yoğunluğunun 1 g/cm³'den daha düşük olması nedeniyle zırh teknolojilerinde kullanılan en hafif malzeme olarak öne çıkmasını sağlamaktadır (Cavallaro 2011).

Düşük yoğunluğa sahip UHMWPE fiberleri, hafif olmalarına rağmen yüksek elastikiyet, yüksek kopma dayanımı, yüksek aşınma direnci vb. mekanik özellikleri ile balistik ürünlerin üretiminde kullanılan malzemeler arasında ön plana çıkmaktadır (Sözen 2016).

Yüksek karbon içeren çeliklere kıyasla daha yüksek aşınma dayanımına sahip olan Ultra Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen (UHMWPE) fiberler, molekül ağırlığına göre çelik malzemeden 15 kat, aramid fiberlerden ise %40 daha güçlüdür (Sözen 2016). Bu durum UHMWPE fiberlerinin aramid fiberlerden daha fazla tercih edilmesini sağlamaktadır.

UHMWPE fiberlerin dikkate değer bir diğer özelliği de ultraviyole ışınlarına ve suya karşı dirençli yapısı sayesinde çevresel koşullara karşı aramid fiberlere göre daha az duyarlı olmalarıdır (Sözen 2016).

2.5 Polimer Reçineler

Polimer reçineler genellikle kompozit malzemelerin matris fazını oluştururlar ve malzemeyi bir arada tutarken yapısal olarak ta basma ve kayma dayanımı gibi mekanik özelliklerde belirleyici rol oynamaktadırlar (Eskizeybek 2012).

Polimer reçineler termoplastikler ve termosetler olmak üzere iki ana gruba ayrılırlar. Polimer matrisli kompozitlerde takviye elemanlarını bir arada tutan matris malzemeleri termoset veya termoplastik olabilir. Termoplastikler, uzun hidrokarbon moleküllerinden oluşur ve bu moleküller birbirlerine zayıf Van der Waals bağları ve mekanik kilitlenmeler ile bağlıdırlar. Bu bağların, kovalent bağlara göre oldukça zayıf olmasından dolayı termoplastikler kolaylıkla eritilebilirler. Ayrıca sıcaklığın artması halinde mekanik kilitlenme etkisi de azalacağı için termoplastik reçinelerin viskoziteleri kolaylıkla

azaltılabilir. Dolayısıyla termoplastikler sıcaklıkla tekrar şekil verilebilen plastik türüdür (Eskizeybek 2012, Sheikh-Ahmad 2009).

,Termosetler, termoplastikler gibi polimer malzemelerdir. Ancak, bu iki polimer tipi arasındaki temel fark, monomerlerin bağlanma tipidir. Termoset polimerlerde monomerler, birbirlerine "çapraz bağlanma" adı verilen kimyasal bir bağlanma türüyle bağlanır. Bu bağ, elektriksel Van der Waals bağından çok daha güçlüdür çünkü kimyasal bir bağdır. Çapraz bağlanma, daha zor bir süreç olduğundan, termoset polimerlerin kütleme tamamlandıktan sonra ısıtılarak yeniden şekillendirilmesi mümkün değildir. Termoset polimerler, termoplastik polimerlere göre daha kırılğan bir yapıya ve çok daha yüksek bir mukavemete sahiptir. Bu nedenle, genellikle kompozit üretiminde tercih edilirler (Üstün 2020).

Yapıştırıcı, kaplama, laminasyon, kapsülleme, elektronik/elektrik yalıtımı ve kompozit uygulamalar gibi birçok alanda yüksek performanslı bir malzeme olarak kullanılan epoksi reçineler, mükemmel mekanik özellikleri, düşük maliyeti, kolay işlenmesi, birçok alt tabakaya yapışması, düşük çekme oranı, yüksek elektrik yalıtımı, iyi fizikokimyasal, dielektrik ve yaşlanma özellikleri ile iyi kimyasal dayanım gibi özellikleri sayesinde, geniş bir uygulama alanına sahip termoset matrisler olarak kullanılmaktadır (Doğan vd. 2020).

Kompozit yapımında sıklıkla kullanılan polimer matris malzemelerden birisi olan epoksi reçine, yüksek mekanik mukavemeti, korozyon direnci, ölçüsel kararlılığı, dolgu ve fiber takviyeleri ıslatabilme kabiliyeti ve kimyasal direnci ile ön plana çıkmış termoset polimer malzemedir. Sahip olduğu bu özelliklerinden dolayı kompozitlerde matris malzemesi olarak kullanılmasının yanı sıra korozyona karşı yüzey kaplamalarında, yapıştırıcılarda, boya malzemelerinde, yarı iletken kapsüllerde, hafif köpük malzemelerde, endüstriyel kalıp uygulamaları ve biyomedikal uygulamalar gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır (Şen 2022).

2.6 Nanopartikül Teknolojisi

Gelişen teknoloji ile birlikte çağın gereksinimlerine uyum sağlamak ve daha akılcı çözümler üretmek amacıyla malzeme biliminde sürekli yeni araştırmalar ve ürün

geliştirmeleri yapılmaktadır. Son dönemlerde üstün özellikleri ile malzeme bilimi, biyoteknoloji, tıp, çevre bilimi ve birçok diğer alanda devrim niteliğinde fark yaratan nanopartikül teknolojisi üzerinde oldukça fazla ürün geliştirmesi ve çalışmalar yürütülmektedir.

2.6.1 Nanopartikül

Nanopartiküller genel tanım itibarıyla boyutları 1 ila 100 nanometre seviyesinde olan parçacıklardır. Bu oldukça küçük boyutları, nanopartiküllere benzersiz fiziksel ve kimyasal özellikler kazandırmaktadır. Nanopartiküller, genel olarak metal, metal oksit, polimer ve karbon gibi çeşitli malzeme gruplarından elde edilmektedir (Bhushan 2017).

Nanopartiküller birden çok üstün özelliğe sahiptirler. Bu özelliklerin en başında yüksek yüzey alanı gelmektedir. Nanopartiküller, büyük yüzey alanı/hacim oranına sahiptir ve bu durum katalitik aktivitelerini ve etkileşim kapasitelerini artırmaktadır. Nanopartiküllerin yüzey özellikleri, boyutu, şekli ve kimyasal bileşimi gibi özellikleri, uygulamaya özgü olarak özelleştirilebilmektedir. Diğer taraftan optik özellikler kapsamında ışıkla etkileşimlerinde benzersiz özellikler gösteren nanopartiküller optoelektronik cihazlar ve görüntüleme teknolojileri için önde gelen çözümler arasında yer almaktadır (Alagarasi 2010).

Nanopartiküller üstün özellikleri sayesinde günümüzde birçok uygulama alanında tercih edilmeye başlamış ve önemi gün geçtikçe artmaktadır. Örnek olarak sağlık sektöründe tedavilerde kullanılan ilaçların doğrudan hastalığın olduğu bölgeye ulaşmasını sağlamak amacıyla yürütülen hedefe yönelik ilaç taşıma sistemlerinde ilaç taşıyıcı olarak kullanılabilirken, manyetik nanopartiküller de tıbbi görüntüleme sistemlerinde yaygın olarak tercih edilmektedir (Farokhzad ve Langer 2009, Kircher vd. 2012).

Diğer taraftan su arıtma sistemlerinde kirleticilerin giderilmesi ve hava, toprak kirliliğinin kontrol edilmesi amacıyla çeşitli nanoteknolojik çözümler geliştirilirken, enerji depolama kapasitelerinin artırılması ve güneş pillerinin verimliliğinin artırılması amacıyla enerji biliminde de nanopartikül kullanıma rastlanılmaktadır.

Nanokompozitleri, geleneksel kompozitlerden ayıran en önemli fark bir veya birkaç bileşenin 100 nanometreden daha küçük boyutlara sahip olmasıdır. Nanokompozitler iki fazdan oluşmaktadır. Matris fazı olan birinci faz kristal bir yapıdadır ve polimer, metal veya seramik cinsinden oluşmaktadır. İkinci faz ise dayanıklılık, elektrik iletkenliği, manyetik özellikleri iyileştirmek için özel amaçlar için kullanılan takviye edici ve dolgu maddeleri olarak matris fazında dağıtılan nanometre ölçeğindeki parçacıklardır. Nanomalzemeler konusunda nanokompozitler, büyük bir önem arz etmektedir. Nanokompozitlerin yapısında elyaf ve parçacıkların bulunması genelde matriste dayanıklılığa sebep olmaktadır. Elyaf ve parçacıklar matriste dağıtıldığında, kompozite uygulanan yükler düzenli bir şekilde elyaf ve parçacıklara aktarılabilir. Matriste takviye edici parçacıkların dağıtılmasıyla dayanıklılık, sertlik ve gözeneklilik gibi özellikler değişebilmekte ve oluşan bir çatlağın büyümesi geciktirilebilmektedir. Ayrıca nanokompozitler, matris ve takviye ediciler arasındaki yüzeysel etkileşim neticesinde daha iyi özelliklere sahip olmaktadır (Visakh 2016).

2.6.2 Balistikte Kullanılan Nanopartiküller

Üstün özelliklere sahip nanopartiküller malzemelerin performansını ve dayanıklılığını artırmak için gün geçtikçe daha fazla araştırılan ve üzerine birçok çalışma yapılan bir konu haline gelmektedir. Endüstriyel uygulamalardan çevresel uygulamalara kadar birçok alanda tercih edilen nanopartiküller savunma sanayi sektöründe de balistik çözümlerle kullanılmaktadır.

Nanopartiküller, zırh malzemelerinin sertlik ve dayanıklılığını artırmak amacıyla kullanılarak daha ince ve hafif zırhların üretilmesine imkan sağlamaktadır. Mükemmel mekanik özelliklere sahip olan karbon nanotüpler ve grafen gibi nanomalzemeler enerji emilimini artırarak gelişmiş zırhların üretilmesini sağlamaktadır.

Nanopartiküller bir balistik darbe esnasında enerjiyi daha verimli bir şekilde emerek etrafına dağıtabilme özelliğine sahip olduğundan hedefte meydana gelen deformasyonların azalmasına imkan sağlamaktadır. Ayrıca balistik ürünlerde kullanılan nanopartiküller sayesinde matris malzemesinin mikro yapısı güçlenerek yapının genel dayanıklılığında artış meydana gelmektedir. Nanopartiküllerin balistik uygulamalarda

kullanımı her ne kadar daha çok mekanik özelliklerde iyileşme sağlamasından dolayı enerji absorbe etme amacıyla tercih edilse de, malzemelerin kimyasal dayanıklılıklarını artıran bazı nanopartiküller sayesinde ürünlerin çevresel şartlara karşı dayanıklılığı artırılabilir.

Ayrıca nanopartiküller sadece terminal balistik uygulamalarında değil dış balistik alanında da kullanılmaktadır. Kurşunların nüfuz etme potansiyelinin artırılması ve daha yüksek hızlarda daha uzağa gitmesinin sağlanması için nanopartiküller tercih edilmektedir. Diğer taraftan patlayıcı maddelerin daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmasını sağlamak amacıyla kullanılan nanopartiküller daha güçlü ve kontrollü patlamalar elde etmeye yardımcı olmaktadır.

Balistik çözümlerde özellikle hedef balistiğinde kullanılan kişisel koruyucu donanımlar, araç zırhları vb. balistik malzemelerde yüksek mukavemet ve esneklik sunması, ürünlerde hafifleştirme yapılması, aşınma direncinde artış olması amacıyla genel olarak karbon nanotüpler, grafen, nanokil ve seramik nanopartiküller tercih edilmektedir.

2.6.2.1 Nanokil

Kil, kristal yapıları farklı birkaç mineralin bir araya gelmesiyle oluşan bir mineral karışımının genel adıdır. Doğada bol miktarda bulunan kilin saf formuna rastlamak oldukça zordur. Kil mineralleri dışında, yapısında genellikle kalker, silis, mika ve demir oksit gibi maddeler de bulunur. Nanokil, en az bir boyutu nano metre ölçeğinde olan, yüksek boy-en oranlarına sahip partiküllerdir. Tabakalı yapısı, zengin iç kimyası ve kolay erişilebilirliği nedeniyle, hafif ve yüksek performanslı nanokompozit üretimi açısından büyük öneme sahiptir olan nanokil, çok çeşitli ve yüksek performanslı nanokompozit malzemelerin üretimi için yeni nesil bir malzeme olarak görülmektedir (Dindar 2019).

2.6.2.2 Grafen

2010 yılında Nobel Fizik Ödülü, Andre Geim ve Konstantin Novoselov'a grafen hakkındaki çığır açan deneyleri nedeniyle verilmiştir. Bu "mucize materyal" olarak adlandırılan malzeme üzerindeki dikkatler, tek atom kalınlığında ve iki boyutlu kabul edilen kovalent bağlarla birbirine bağlı karbon atomlarının altı bal peteği örgüsü

şeklinde mükemmel bir düzen oluşturmalarıyla yoğunlaşmıştır. Elektron yapıları, oda sıcaklığında kütesiz rölativistik parçacıklar gibi davranarak, grafene kendine özgü kuantum boşluğu gibi özellikler kazandırır. Grafenin belirgin özellikleri arasında geniş yüzey alanı, yüksek elektron mobilitesi, yüksek ısıl iletkenlik ve yüksek Young modülü yer alır (Bedeloğlu, 2016).

Bu malzeme, sahip olduğu üstün özellikler nedeniyle transparan elektrotlar, alan etkili transistörler, sensörler, temiz enerji cihazları, nanokompozitler ve organik fotovoltaiik cihazlar gibi birçok uygulama alanı bulmaktadır (Bedeloğlu, 2016).

Grafen, bilinen en ince malzeme olarak tanımlanır ve kuvvetli karbon bağları sayesinde en güçlü malzemelerden biri olarak kabul edilir. Ayrıca, grafen kolayca esneyebilmesi sayesinde çeşitli malzemelerin yüzeylerini kaplamak için uygun bir malzemedir. Grafen anılan özellikleriyle akademide ve endüstride önemli değişikliklere yol açabilecek önemli bir malzeme olarak değerlendirilmektedir (Adams 2011)

Kompozitlerin üretiminde kullanılan nano partiküller arasında grafen, araştırmacıların ve kompozit üreticilerinin dikkatini çekmiştir. Az miktarda kullanıldığında takviye maddesi olarak, nanokompozitlerin malzeme özelliklerini önemli ölçüde artırabilir. Grafenle güçlendirilmiş polimer matrisli nanokompozitlerin üretimi için çeşitli yöntemler bulunmaktadır ve bu yöntemler, grafenin polimer matris içindeki dağılımını ve kompozitin nihai özelliklerini etkileyebilir (Zhang, 2014). Son çalışmalar, grafen veya grafen nano paletlerinin, mekanik, yapısal, termal ve elektriksel özellikler bakımından nanokompozitlerde olumlu etkiler gösterebileceğini ve önemli katkılar sağlayabileceğini vurgulamıştır (Singh, 2011).

2.6.2.3 Karbon Nanotüp

Karbon nanotüpler, grafenin tüp şeklinde kıvrılmış hali olarak düşünülebilir. Literatürde, cidar sayısına göre üç tür karbon nanotüp tanımlanmakta olup, bunlar tek cidarlı, çift cidarlı ve çok cidarlı karbon nanotüplerdir. Bu nanotüpler dayanıklılık, hafiflik, üstün termal özellikler ve yüksek elektriksel iletkenlik gibi niteliklere sahiptir. Aynı zamanda, uzunluk-çap oranları oldukça büyük nanomalzemelerdir. Karbon nanotüplerin özellikleri,

uzunlukları, çapları, yüzey özellikleri ve yönlenme açılarına bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir (Fan vd. 2008).

Günümüzde, karbon nanotüplerin geniş ölçekte üretimi için ark deşarjı, lazer buharlaştırma ve kimyasal buhar biriktirme gibi yöntemler tercih edilmektedir. Bu teknikler, çeşitli gaz ortamlarında veya vakum koşullarında uygulanmaktadır. Grafit elektrotlarla yapılan ark deşarjı sırasında oluşan yüksek sıcaklık, grafitin buharlaşmasına neden olur ve bu süreçte yaklaşık %30 oranında karbon nanotüp elde edilebilmektedir (Eskizeybek 2012).

Karbon nanotüplerin görülen üstün termal ve mekanik özelliklerine rağmen bu özelliklerden kompozit malzemelerde etkili bir şekilde faydalanabilmek için nanotüplerin reçine içerisinde homojen bir şekilde dağılması ve topaklanmaların önlenmesi gereklidir (Eskizeybek 2012).

Çizelge 2.2:Karbon Nanotüplerin Özellikleri (Eskizeybek 2012)

Özellikler	Değer
Elastisite Modülü	270 GPA-1 Tpa
Çekme Dayanımı	11-63 GPA
Termal İletkenlik	200 W(mK)
Maksimum Akım Yoğunluğu	10 A/m ²

2.6.2.4 Titanyum Karbür

Titanyum Karbür (TiC), titanyum ve karbon elementlerinin birleşiminden oluşan seramik bir bileşiktir. Nanopartikül formunda, titanyum karbürün boyutu nanometre ölçeğinde olup, genellikle 1-100 nm aralığında bulunmaktadır. Boyutlardaki bu küçüklük malzemeye yüksek yüzey alanı ve belirgin kuantum etkileri gibi benzersiz özellikler kazandırmaktadır (Driss 2021).

Karbotermik redüksiyon, termal çöktürme, sol-gel yöntemi ve mekanik alaşımlama vb. farklı üretim teknikleri ile üretimi sağlanan TiC nanopartikülleri üstün özellikleri ve çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılabilirlikleri nedeniyle oldukça ön plana çıkmaktadır (Zhang ve Li 2021).

TiC nanopartikülün belli başlı mekanik özelliklerine değinmek gerekirse; yüksek sertlik değerleri ile ön plana çıkmakta olup kimyasal direnci ile birlikte aşınma dayanımı gereken çözümlerde ideal bir ürün olarak karşımıza çıkmaktadır. Diğer taraftan erime noktasının da 3000 °C üzerinde olması ile yüksek sıcaklık dayanımı gerektiren çözümlerde tercih edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca sertlik ve ısıl dayanımının yanında TiC nanopartikülleri elektriksel ve termal iletkenlikleri ile de ön plana çıkan nanopartiküller arasında yer almaktadır (Zhang ve Li 2021).

Titanyum karbür parçacıkları üstün mekanik özellikleri, benzersiz elektriksel özellikleri ve yüksek sıcaklık dayanımı nedeniyle kompozitlerde takviye fazı olarak etkin bir şekilde kullanılır. İnce taneli TiC, dispersiyon ve tane boyutu mekanizmaları yoluyla kompozitlerin akma mukavemetini artırabilir ve çatlak ilerlemesini engelleyerek tokluğu geliştirebilir (Mhadhbi ve Driss 2021).

2.6.3 Nanopartikül Takviyesinin Mekanik ve Balistik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi

Nanopartiküller üstün özellikleri sayesinde birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Kullanım alanlarından birisi de balistik ana bilim dalı olan nanopartiküllerin yapıya eklenmesi ile mekanik özelliklerde meydana gelen değişimler ve balistik performansa etkileri araştırılmıştır.

2.6.3.1 Nanokil Kullanımının Etkilerinin İncelenmesi

Nanokilin cam elyaf, karbon ve kevlar takviyeli kompozit malzemelerin reçinesine eklenmesinin mekanik, termomekanik ve yorulma özelliklerine etkisi birçok araştırmacı tarafından araştırılmıştır. Çalışmalarda genel olarak, düşük miktarlarda ilave edilen nano takviyenin malzemenin yorulma ömrüne, rijitlik değişimine, çekme dayanımına, elastisite modülüne ve camsı geçiş sıcaklığına etkilerini ele alınmıştır (Ünal 2016).

Kevlar dolgulu epoksi matrisin balistik çarpma davranışı üzerine Pekbey vd. (2017) bir çalışma yürütmüştür. Çalışmalarında Kevlar-epoksi kompozitin balistik darbe performansını daha düşük ağırlıklarda da artırmak için nanokil, nanokalsit ve nanokarbon olmak üzere üç farklı dolgu maddesi takviyesini kullanmışlardır. Epoksi matris içerisine epoksi reçine-sertleştirici karışımının ağırlıkça % 1 ve %2'si kadar nanokil ve nanokalsit %0.5, %1 ve %2'si kadar ise nanokarbon takviye etmişlerdir.

Pekbey vd. (2017), el yatırması yöntemi ile üretmiş oldukları numunelere uyguladıkları balistik darbe deneylerinden elde ettikleri sonuçları hasar ve delinme açısından değerlendirmişlerdir. Ayrıca nano takviyenin balistik performansa etkisini tespit etmek amacıyla hazırlamış oldukları numunelere uyguladıkları balistik darbe testinde hedefin arkadan tam olarak delinip delinmediğini gözlemlemişlerdir.

Elde edilen sonuçlarda epoksi matrisine dağılmış küçük miktarlarda nanokil ve nanokalsit varlığının Kevlar/epoksi kompozitlerinin darbe özelliklerini arttırdığı Pekbey vd. (2017) tarafından tespit edilmiştir. Balistik performans açısından en iyi performansın ağırlıkça %1 nanokil ve %2 nanokalsit dolgulu epoksi reçine ile üretilen numunelerde elde edildiğini gözlemlemişlerdir.

Ancak nanokarbon ilavesi yapılan numunelerde ise Kevlar-epoksi kompozitlerin balistik performansı %0 nanopartikül konsantrasyonuna sahip plakalarda elde edilen sonuçlara göre azalma göstermiştir. Pekbey vd. (2017), bu durumun epoksi matrisinde nanokarbon varlığının balistik test sırasında Kevlar fiber takviyeli plastik plakaların arıza mekanizmalarının sünek moddan daha kırılğan moda geçişine neden olmasından kaynaklandığını değerlendirmişlerdir.

Karippal vd. (2011), cam/epoksi kompozit malzemesine nano kil takviyesinin mekanik özelliklere katkısını araştırmıştır. Elde edilen sonuçlara göre ağırlıkça %5'e kadar eklenen nano kil takviyesinin, çekme mukavemeti, elastiklik modülü, eğme modülü, dayanıklılık ve katmanlar arası kayma mukavemetinde artışa sebep olduğu, ancak ağırlıkça %5'ten fazla takviyenin ise mekanik özelliklerde azalmalara sebep olduğunu gözlemlemişlerdir.

Nanokil takviyesinin etkilerinin incelenmesi için yürütülen başka bir çalışmada Hosseini ve Paul (2014), ağırlıkça %0, %1, %2, %3, %5 ve %7 nanokil takviyesi içeren cam/epoksi kompozitlerin çekme ve eğme mukavemetindeki değişimini araştırmışlardır. Vakum infüzyon yöntemi kullanılarak ürettikleri numunelere yaptıkları mekanik testler sonucunda çekme ve eğme mukavemetlerindeki en çok artışın, nanokil takviyesinin ağırlıkça %3 ve %7 oranında takviye edildiği numunelerde meydana geldiği tespit etmişlerdir.

Diğer taraftan Pol vd. (2016), nano kil ve nano silika katkısının, cam/epoksi katmanlı kompozitlerin gerilme özellikleri üzerindeki etkisini inceledikleri bir araştırma yürütmüşlerdir. Çalışmalarında cam/epoksi kompoziti içerisine ağırlıkça % 3, 5, 7 ve 10 oranında nano kil ve % 0,5, 1 ve 3 oranında nano silika takviye edilerek hazırladıkları numunelere mekanik testler uygulamışlardır. Yaptıkları analizlerin sonucunda nanokil takviyesinin uygulandığı numuneler arasında ağırlıkça %3 takviye oranına sahip numunelerde en düşük, ağırlıkça %5 takviye oranına sahip numunelerde ise en yüksek değerlerin elde edildiği gözlemlenmiştir. En iyi sonuçların elde edildiği ağırlıkça %5 karışım oranında malzemenin tokluğunda %10 ve çekme mukavemetinde %7 artış meydana gelmiştir.

Aynı çalışmada nano silika takviye edilmiş numuneler arasında mekanik özelliklerde en yüksek artış nano silikanın ağırlıkça %0,5 oranında ilave edildiği numunelerde görülmüş olup, %0,5 nano silika takviyesi ile birlikte malzemenin çekme mukavemetinde %10 ve tokluğunda %27 artış meydana gelmiştir.

Yürütülen başka bir çalışmada ise Raghu vd. (2016) tarafından, cam fiber takviyeli epoksi matrisli kompozitlerde nanokil ilavesinin mekanik özellikler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmada, belirli bir miktardaki nanokil takviyesinin mekanik özelliklerde artışa sebep olduğu görülmüştür. Ağırlıkça %1-7 arasında farklı nanokil takviyesinin kullanıldığı çalışmada en iyi sonuçlar %1, 3, ve 5 oranlarındaki takviyelerde elde edildiği tespit edilmiştir.

Nanokil takviyesi ile güçlendirilmiş kompozitlerin davranışlarının incelendiği çalışmalar arasında yer alan Pol ve Liaghat (2012) tarafından yürütülen çalışmada nanokil takviyesinin cam/epoksi lamine kompozitlerin davranışı üzerindeki etkisi, balistik darbe, X-ışını kırınımı ve çekme testleri yapılarak araştırılmıştır. Yapılan çalışmada cam elyaf dokuma kumaşlarına, epoksi matris ağırlığının %0, %1, %2, %3, %5 ve %7 oranlarında nanokil partikülleri takviyesi ile güçlendirme yapılmıştır.

Pol ve Liaghat (2012) tarafından nanokil takviyesinin Young modülü üzerindeki etkisinin incelenmesi için hazırlanan numunelere yapılan analizlerde en iyi sonuçlar ağırlıkça %3 nanokil takviyesi olan numunelerde yaklaşık %16'lık bir artış ile gözlemlenmiştir.

Balistik etki altında nanokil parçacıklarının eklenmesi ile enerji emme kapasitesinin iyileştirilebileceğini ve balistik sınıra yakın darbe hızlarında nanokil ilavesi ile enerji sönümleme kabiliyetinin arttırılabileceğini değerlendiren Pol ve Liaghat (2012) nanokil takviyesi ile hazırlamış oldukları numunelere düşük hızlarda uygulamış oldukları balistik testler sonucunda enerji soğurma kapasitesinde en iyi sonuçları ağırlıkça %5 nanokil takviyesi ile yaklaşık %5'lik bir artış ile elde etmişlerdir. Aynı zamanda balistik testlerde elde ettikleri sonuçlara göre özellikle balistik sınıra yakın darbe hızlarında, nanokil parçacıklarının eklenmesinin sadece mekanik özellikleri değil aynı zamanda enerji emme kabiliyetini de arttırdığını gözlemlemişlerdir.

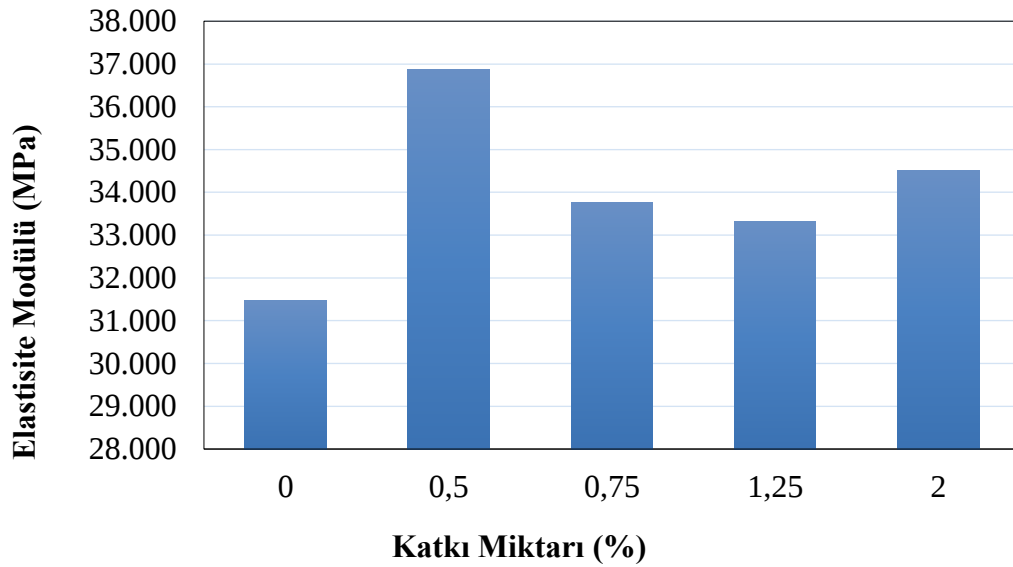
Dokuma cam kumaş ve epoksi kompozit malzemelerde nanokil ilavesinin mekanik ve yorulma dayanımı üzerindeki etkisini inceleyen Ünal (2016), çalışmada ağırlıkça %0.5, %0.75, %1.25 ve %2 karışım oranlarında nanokil ilavesi ile ürettiği numunelere çekme, üç nokta eğme, düşük hız darbe ve yorulma deneyleri yapmıştır. Deneylerde kullanılacak olan nanokil içermeyen ve farklı karışım oranlarında nanokil içeren kompozit plakaları el yatırması yöntemi ile üretmiş ve nanokillerin epoksi reçine içerisinde homojen bir şekilde dağılmasını sağlamak için ultrasonik karıştırıcı yardımıyla karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir.

Yapılan çekme deneyleri sonucunda, nanokil katkısı içeren numunelerin tüm karıştırma oranlarında elastisite modülünün arttığı gözlemlenmiştir. Elastisite modülünde en fazla

artış ise Çizelge 2.3’de görüldüğü üzere %0,5 nanokil içeren numunelerde katkısız numunelere kıyasla yaklaşık %17 oranında bir artış ile elde edilmiştir.

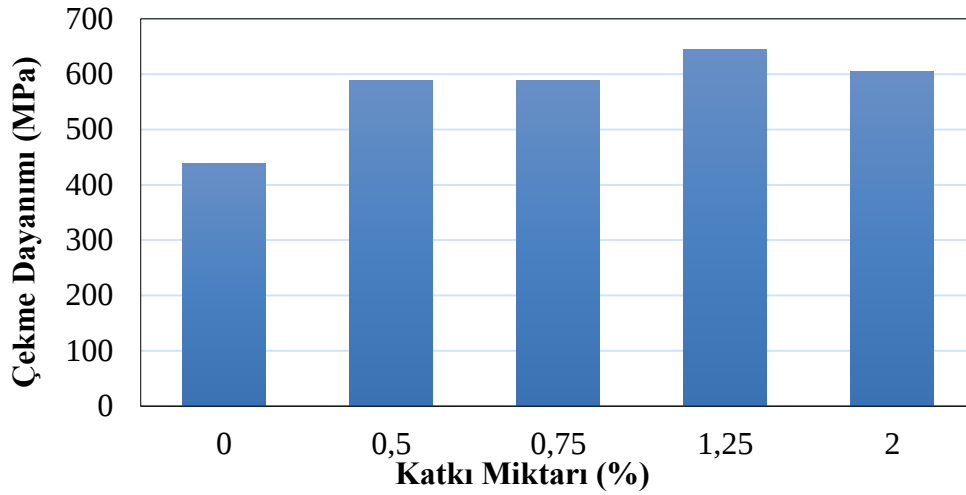
Çizelge 2.3:Nanokil Takviyeli Numunlerde Çekme Testi Sonuçları (Ünal 2016)

S.Nu.	Katkı Miktarı	Elastisite Modülü (MPa)
1	0%	31.468
2	0,50%	36.883
3	0,75%	33.765
4	1,25%	33.323
3	2%	34.517



Şekil 2.2: Nanokil Takviyesinin Elastisite Modülüne Etkisi (Ünal 2016)

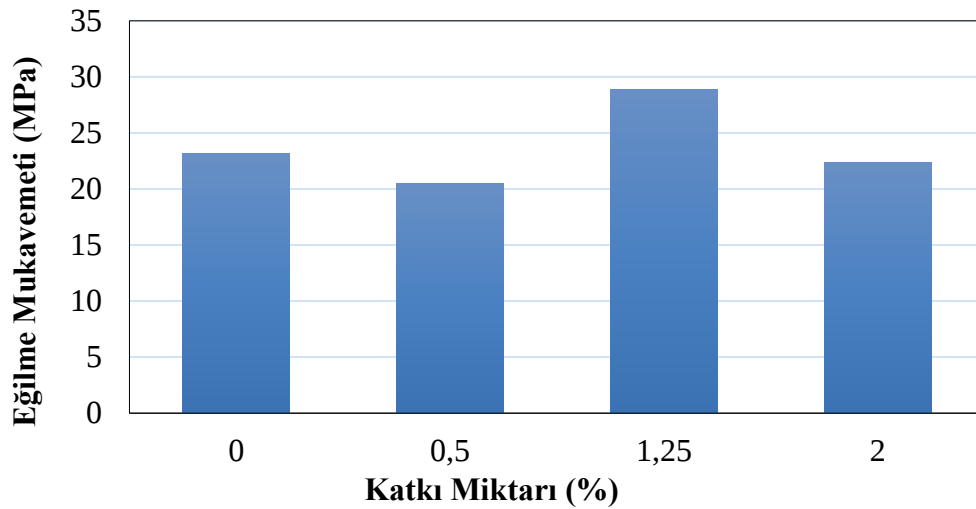
Aynı şekilde Şekil 2.3’de görüldüğü üzere çekme deneyi sonuçlarına göre, nanokil ilavesi kompozit malzemenin çekme dayanımını tüm karıştırma oranlarında artırmıştır. Nanokil ilavesinin maksimum etkisi %1,25 nanokil içeren numunelerde katkısız numunelere oranla %46’lık bir artış ile görülmüştür.



Şekil 2.3: Nanokil Takviyesinin Çekme Dayanımına Etkisi (Ünal 2016)

Üç nokta eğme deneyleri yapılan numunelerde ise nanokil katkısı tüm karışım oranlarında eğilme modülünde artışa sebep olmamıştır. Deney sonuçlarından elde edilen verilere göre hazırlanan ve Şekil 2.4’de sunulan grafikte de görüldüğü üzere nanokil içeriği %1,25 olan örneklerin eğilme modülü nanokil katkısız numunelere kıyasla yaklaşık %24 oranında artarken; ağırlıkça %0,5 ve %2 nanokil içeriği olan numunelerde ise eğilme modülünün nanokil katkısız numunelere kıyasla sırasıyla yaklaşık olarak %11 ve %3 oranlarında azaldığı gözlemlenmiştir.

Ünal (2016) tarafından bu azalmanın nanokilin epoksi reçine içerisinde homojen bir şekilde karışmaması sonucu topaklanmaların oluşmasından kaynaklı olduğu değerlendirilmiştir.



Şekil 2.4: Nanokil Takviyesinin Eğilme Direncine Etkisi (Ünal 2016)

Khan vd. (2010) tarafından nanokil ilavesi ile güçlendirilmiş karbon fiber takviyeli epoksi matrisli kompozit plakaların yorulma ve çekme dayanımlarının araştırıldığı bir çalışma yürütülmüştür. Çalışmada katkısız ve reçine ağırlığının %3 ve %5 oranında nanokil ilavesi içeren kompozit plakalar üzerinde yapılan çekme testi ve yorulma testleri uygulanmıştır. Çekme testi sonucunda takviye edilen nanokil ile birlikte numunelerin çekme dayanımı ve kopma uzaması değerlerinde artış olduğu gözlemlenmiştir. Aynı şekilde yapılan yorulma testinde aynı gerilme seviyelerinde, nanokil içeren numunelerin ömrünün, yalın numuneye göre daha uzun olduğu tespit edilmiştir.

Yürütülen diğer bir çalışmada Ferreira vd. (2012), nanokil ile güçlendirilmiş epoksi matrisli kevlar kompozit malzemelerin yorulma ve üç nokta eğilme özelliklerini araştırmışlardır. Nanokil oranı sabit %3 olarak belirledikleri çalışmalarında çekme testi sonuçlarında nanokil ilavesinin rijitliği %10 oranında arttırdığını ancak dayanımın %2 oranında azaldığını gözlemlemişlerdir. Nanokil ilaveli ve yalın numunelere yapmış oldukları yorulma testi sonucunda ise yorulma dayanımında %12'lik bir artış tespit etmişlerdir. Diğer taraftan, yaptıkları üç nokta eğme testinde, takviyesiz numuneye kıyasla nanokil takviyeli numunenin rijitliğinin %28 daha yüksek olduğu, ancak dayanımının ise daha düşük olduğuna dair sonuçlar elde etmişlerdir.

Avila vd. (2007) yaptıkları çalışmalarında düz dokuma cam fiber kumaş üzerine nanokil ile takviye edilmiş epoksi reçine sürerek darbe özelliklerini incelemişlerdir. Darbe testlerinde kullanılmak üzere hazırlanan numunelerde epoksi içerisine ağırlıkça %1, %2, %5 ve %10 oranlarında nanokil takviye etmişlerdir. Yapılan testlerde darbe enerjisi olarak sırasıyla 20 J, 40 J, 60 J ve 80 J tercih edilmiş olup, darbe ucunun numune üzerinde birden fazla sekmesine izin vermişlerdir. Yapmış oldukları test sonuçlarına göre, enerji seviyesinin artması ile sekme sayısında azalma olduğunu gözlemlemişlerdir. Diğer taraftan nanokil miktarının artması ile rijitliğim arttığı, ancak kırılma tokluğu ve darbe sönümlleme enerjisinin azaldığı tespit edilmiştir. En iyi sonuçlar rijitlikteki artışın %11 seviyelerinde olduğu %5 nanokil takviyesinde edilmiş olup, darbe enerjisinin 80 J'e getirilmesi sonucunda sadece %5 nanokil ilaveli numunede delinme gerçekleşmediği gözlemlenmiştir.

Reis vd. (2013) tarafından kevlar fiber takviyeli nanokil ile güçlendirilmiş epoksi matrisli kompozit malzemenin düşük hızlı darbe davranışının incelendiği bir çalışma yürütülmüştür. Epoksi matris içerisine ağırlıkça %1,5 %3 ve %6 oranlarında nanokil takviye edilen numuneler ve yalın numuneler üzerinde yapılan testlerde darbe ucunun sektiği ve numunenin hasar aldığı gözlemlenmiştir. Yapılan testlerde takviye miktarı arttıkça tepe tepki kuvvetinin de arttığı tespit edilmiş olup, deneylerde en iyi sonuç %6 nanokil takviyesi ile elde edilmiştir.

Wang vd. (2005) tarafından gerçekleştirilen araştırmada, nanoklinin epoksi üzerindeki mekanik özellikleri ve kırılma tokluğu üzerindeki etkisi incelenmiştir. Araştırmada elde ettikleri sonuçlar, nanokil takviyesi ile kırılma tokluğunda %2,5'lik bir artışın meydana geldiğini göstermiştir.

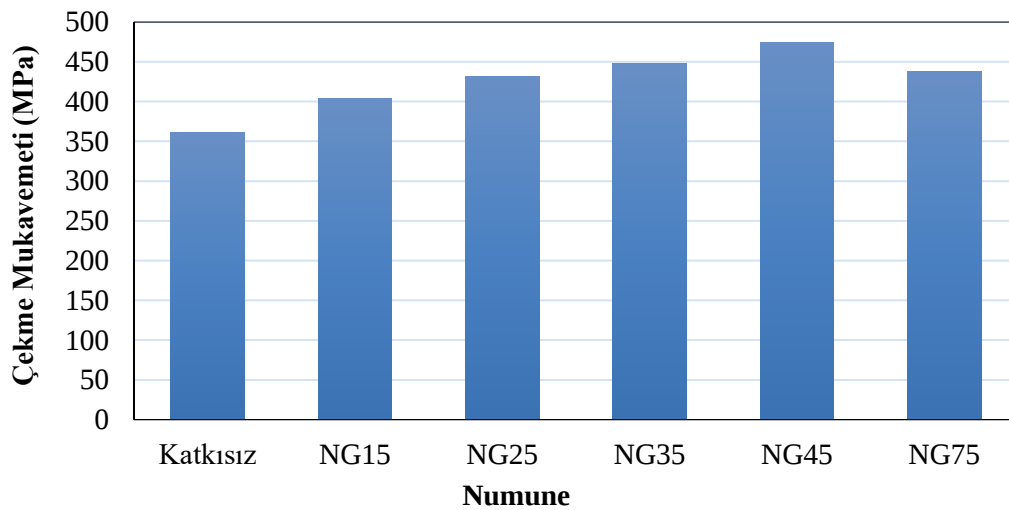
2.6.3.2 Grafen Kullanımının Etkilerinin İncelenmesi

Grafenin çok az miktarlarda katkı olarak kullanılması ile bile polimerlere ileri özellikler katması nedeniyle Doğan vd. (2021) tarafından elektriksel iletkenlik ve mekanik özellikleri iyileştirilmiş epoksi kompozitler elde etmek için epoksi içerisine ağırlıkça %0,05, %0,1, %0,25, %0,5 ve %1 oranlarında grafen eklemiş ve nanokompozit filmler üretilmiştir. Yaptıkları çekme testi sonucunda grafen/epoksi nanokompozitlerin maksimum gerilme değerinin grafen içeriği arttıkça artış eğiliminde olduğu ve en yüksek artışın %1'lik grafen katkısında katkısız epoksiye göre %33,84 oranında olduğu tespit edilmiştir. Diğer taraftan grafen ilavesinin elektriksel iletkenliğe etkisinin belirlenebilmesi için yapılan testlerde de benzer şekilde grafen miktarının artması ile hacimsel direnç ve yüzeysel direnç değerlerinde azalma eğilimleri gözlemlenmiştir. Sonuç olarak Doğan vd. (2021) tarafından, epoksiye ilave edilen grafen miktarının artması ile nanokompozit filmlerin elektriksel iletkenliğinin ve gerilme değerlerinin arttığı gözlenmiş ve elde edilen nanokompozit filmlerin sağladığı iyileştirilmiş elektriksel iletkenlik ve mekanik özellikler sayesinde endüstriyel uygulamalarda kullanılabileceği değerlendirilmiştir.

Başka bir çalışmada Khakzad (2017) tarafından farklı takviye oranlarında (%0.15, %0.25, %0.35, %0.45 ve %0.75) grafenle güçlendirilmiş cam elyaf takviyeli polimer matrisli

nanokompozitlerin mekanik özelliklerinin incelenerek yüksek mekanik özellikleri elde etmek için gerekli optimum grafen yüzdesinin tespit edilmesinin amaçlandığı bir çalışma yürütülmüştür. Çalışmada vakum infüzyon yöntemi kullanılarak üretilen numunelere çekme, üç nokta eğme ve serbest ağırlık düşürme darbe deneyleri uygulanarak, grafen nano parçacıkların malzeme özelliklerine olan etkisinin araştırılmıştır.

Khakzad (2017) tarafından numunelerin davranışlarının incelenmesi için yapılan çekme deneyinde elde edilen sonuçlar Şekil 2.5’de gösterilmiş olup, grafen oranının %0,45’e kadar artması, çekme mukavemetinin neredeyse düzenli bir şekilde artmasına neden olmuştur. En yüksek çekme mukavemeti NG45 deney numunesinde elde edilmiştir. Söz konusu numunede, çekme mukavemeti katkısız numuneye göre %31,29 artarken, şekil değiştirmesi ise %18,75 azalmıştır. Ayrıca, aynı karıştırma oranında elastiklik modülü %43,96 artarken, tokluğu %76,31 oranında artmıştır. Ancak, grafen oranının %0,75’e artması bu değerlerin düşüşüne neden olmuştur.



Şekil 2.5: Grafen İlavesinin Çekme Mukavemetine Etkisi (Khakzad 2017)

Diğer taraftan numunelerin eğme yükü altındaki davranışlarını incelemek için üç nokta eğme deneyi yapan Khakzad (2017) grafen miktarı arttıkça eğilme mukavemetinin de arttığını gözlemlemiştir. Çizelge 2.4’de de görüldüğü üzere, en yüksek eğme mukavemeti değeri NG25 deney numunesinde elde edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde söz konusu numunede katkısız numuneye oranla eğme mukavemeti %34,74 oranında artmış, şekil değiştirmesi ise %17,52 oranında azalmıştır. Diğer taraftan NG25 numunesinin katkısız

numuneye göre eğme elastiklik modülü %52,48 artarken, tokluğu ise %20 azalmıştır. Nano parçacık miktarı ağırlıkça %0,25'den fazla olan numunelerde ise eğme mukavemetinde düşüş gözlemlenmiş olup, katkılı numuneler arasında en düşük eğme mukavemeti NG75 numunesinde tespit edilmiştir.

Çizelge 2.4: Grafen İlavesinin Eğilme Mukavemetine Etkisi (Khakzad 2017)

S.Nu.	Numune	Eğilme Mukavemeti (MPa)
1	Katkısız	497
2	NG15	630
3	NG25	670
4	NG35	604
3	NG45	582
4	NG75	517

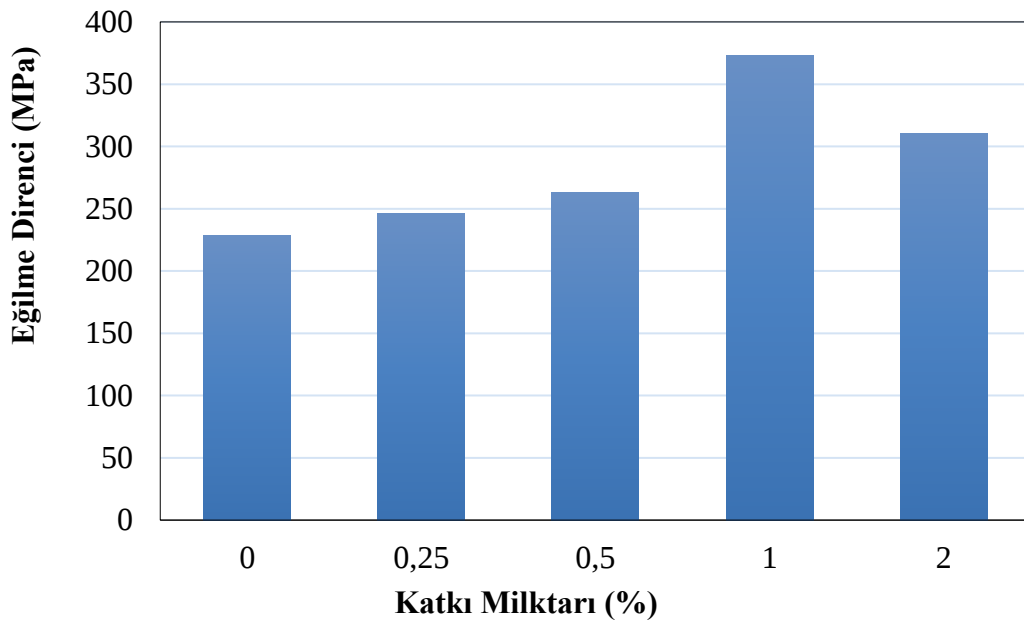
Numunelere Khakzad (2017) tarafından uygulanan serbest ağırlık düşürme darbe deneyinde, ivme, yer değiştirme ve şekil değiştirmesi gibi parametreler incelenerek grafen nano parçacıklarının malzeme özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Yapılan deneyde NG25 deney numunesinde grafensiz numuneye göre sırasıyla %44 ve %74,15 oranında artış ile en yüksek ivme ve en düşük yer değiştirme değeri tespit edilirken, grafen oranının artmasıyla bu değerlerde düşüş gözlemlenmiştir.

Grafen nanopartikülünün ilavesinin kompozit malzemelerin özellikleri üzerindeki etkisinin araştırıldığı bir diğer çalışmada Kamar vd. (2014) tarafından cam/epoksi kompozit üzerinde grafen takviyesinin etkileri incelenmiştir. Cam/epoksi kompozit içerisine ağırlıkça %0,1 %0,25 %0,5 ve %1 oranında grafen takviyesi yapmış oldukları nano kompozitlerin üretimini vakum infüzyon yöntemi yardımıyla yapmışlardır. Elde ettikleri sonuçlar grafen oranının artmasıyla eğme mukavemeti ve tokluk değerlerinin arttığını göstermektedir. En yüksek sonuçlar katkısız numuneye göre eğme mukavemetinde %29 ve toklukta %25,5 artış ile grafen oranının %0,25 olduğu numunelerde elde edilmiştir. Ancak grafen oranı %0,25'ten fazla olduğunda bu değerlerde azalma meydana gelmiştir. Kamar vd. (2014) tarafından bu durumun yapıda

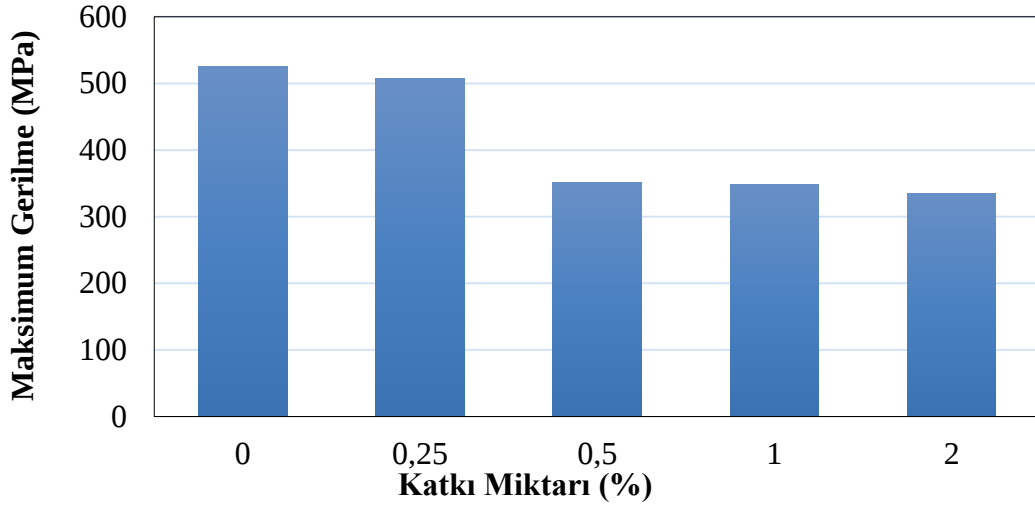
boşlukların oluşması ve cam fiber etrafında nano parçacıkların topaklanmasına ve boşlukların çatlak benzeri davranarak, topaklanan nano parçacıklar da fiber ile matris arasındaki yapışkanlığı azaltması sonucunda kompozitin yapısının olumsuz etkilenmesinden kaynaklandığı şeklinde yorumlanmaktadır.

Diğer taraftan Şen (2022) tarafından yürütülen çalışmada, dokuma aramid fiber epoksi kompozitlerin mekanik özelliklerine grafen nanopartikül ilavesinin etkisi araştırılmıştır. Çalışmada grafen etkilerinin araştırılması amacıyla ağırlıkça %0.25, %0.5, %1 ve %2 oranlarında grafen nanopartikülleri epoksi matrisine karıştırılarak, el yatırması ve vakum infüzyon yöntemiyle 5 katlı grafen/aramid/epoksi kompozit plakalar üretilmiştir. Üretilen kompozit plakalara yapılan üç nokta eğme ve çekme testleri sonucunda grafen ilavesinin eğilme dayanımını ve eğilme modülünü arttırdığı, en yüksek eğme geriliminin %1 grafen ilaveli numunelerde elde edildiği tespit edilmiştir (Şekil 2.6Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.).

Ancak, çekme testleri sonuçları analiz edildiğinde Şekil 2.7’de görüldüğü üzere en yüksek çekme dayanımının katkısız numunede olduğu, %0.25 grafen ilavesinden sonra ise çekme dayanımının düştüğü görülmüş olup, bu durum Şen (2022) tarafından yapıda oluşan aglomerasyona bağlı olduğu değerlendirilmiştir.



Şekil 2.6: Grafen Katkısının Eğilme Dayanımına Etkisi (Şen 2022)



Şekil 2.7: Grafen Katkısının Çekme Dayanımına Etkisi (Şen 2022)

2.6.3.3 Karbon Nanotüp Kullanımının Etkilerinin İncelenmesi

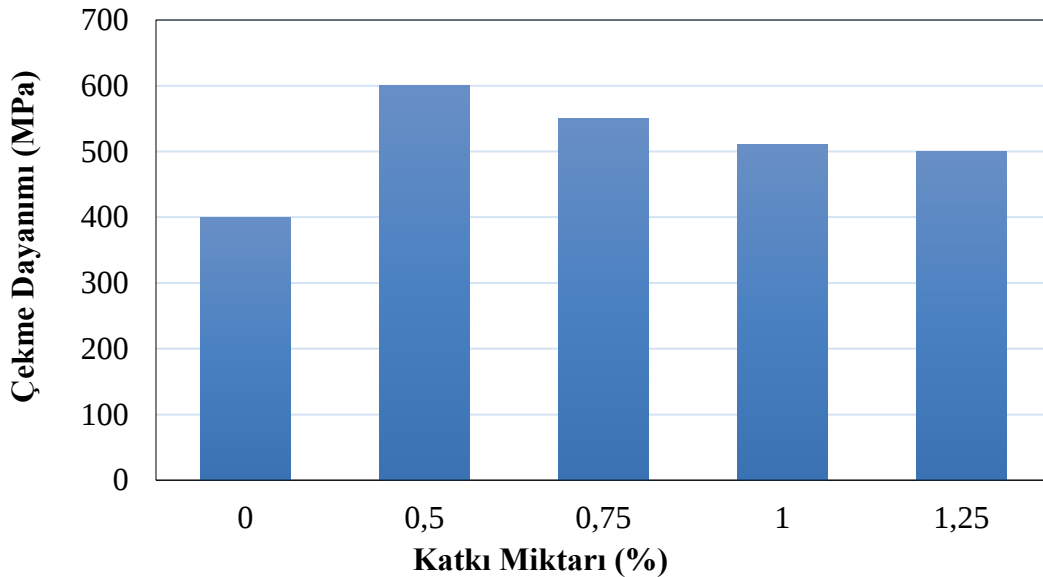
Kevlar/cam elyaf/karbon fiber takviyeli epoksi matrisli kompozit malzemelerin mekanik ve balistik performanslarının iyileştirilmesi amacıyla epoksi içerisine ilave edilen çok çeşitli nanopartikül takviyeleri arasında literatürde karşımıza yaygın olarak çıkan nanopartiküllerden bir diğeri ise karbon nanotüptür.

Öner vd. (2017) tarafından karbon nanotüp takviyeli dokuma cam kumaş ve epoksi bileşenlerinden oluşan bir kompozitin üretildiği ve numunelerin çekme, eğilme ve termomekanik yükleme etkisi altındaki davranışlarının incelendiği bir çalışma yürütülmüştür. Karbon nanotüpün takviyesinin etkilerinin incelenmesi için yürütülen çalışmada katkısız üretilecek olan numunelere ilave olarak üretilecek olan karbon nanotüp katkılı numunelerde karışım oranı olarak ağırlıkça %0,5, %0,75, %1 ve %1,25 oranları tercih edilmiştir.

Öner vd. (2017) tarafından yapısı gereği bir arada bulunma davranışına sahip karbon nanotüpler epoksi reçineye eklenirken, ses dalgalarıyla karbon nanotüp toplarının parçalanması ve epoksi reçineye ayrılmış şekilde dağılmalarını sağlayan ultrasonik karıştırma kullanılmış ve nanotüplerin epoksi reçine içinde homojen bir şekilde dağılmaları sağlanmıştır. Elde ettikleri karışımı dokuma cam elyaf kumaşlara el yatırması yöntemi ile lamine ederek prepreg haline getirmişler ve 15 kattan oluşan panelleri 120°C sıcaklık ve 6 bar basınç altında hidrolik pres yardımıyla sıcak presleme işlemi uygulayarak kompozit plakaları oluşturmuşlardır.

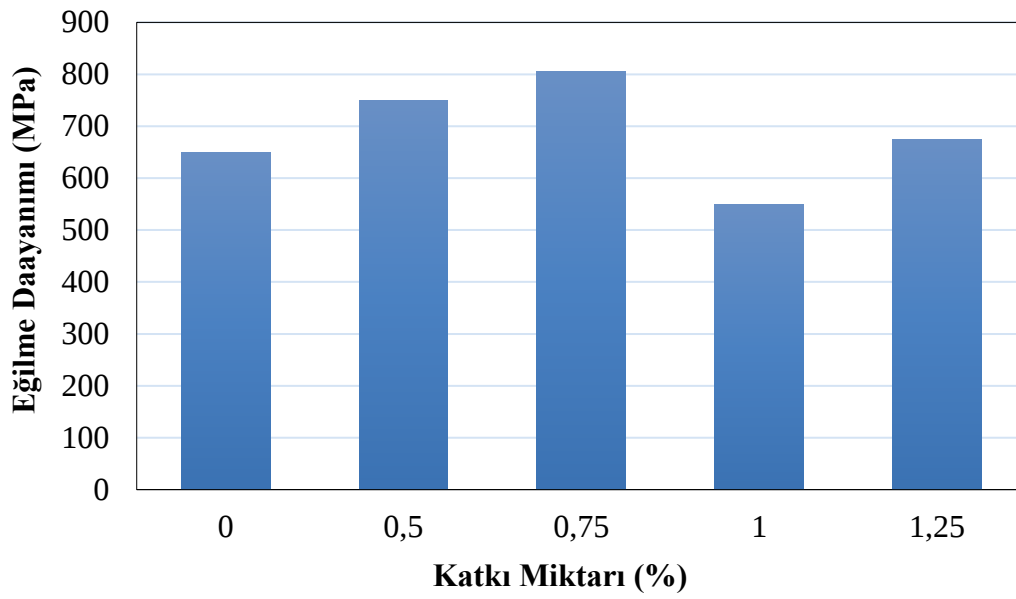
Yapılan deneylerde karbon nanotüp takviyesinin malzemenin çekme, eğilme dayanımı ve termomekanik özelliklerini değiştirdiği Öner vd. (2017) tarafından gözlemlenmiştir. Çekme testi sonuçlarında epoksi matrisine karbon nanotüp ilave edilmesinin malzemenin elastisite modülünü ve çekme dayanımını iyileştirdiği tespit edilmiştir. Söz konusu özelliklerde en fazla artış, ağırlıkça %0,5 oranında karbon nanotüp ilave edilmesiyle oluşturulan kompozit malzemede görülmüş olup, Şekil 2.8’de de görüldüğü üzere, katkısız ve % 0,5 katkılı numunelerde çekme dayanımları sırasıyla 410 MPa ve 600 MPa olarak elde edilmiştir. Ayrıca, karbon nanotüp ilave edilen numunelerde katkısız numunelere oranla kopma uzaması miktarın da artış elde edilmiştir.

Öner vd. (2017)’ye göre eklenen karbon nanotüp, reçine–fiber ara yüzey özelliklerini iyileştirmiş ve kompozite gelen kuvvetlerin fiberlere daha homojen aktarılmasını sağlamış, kuvvetlerin büyük bir kısmının fiberler tarafından taşınmasından dolayı da malzemenin dayanımı artmıştır. Ağırlıkça karbon nanotüp miktarının artırılması, kompozit malzemenin çekme özelliklerinde değişikliklere yol açmıştır. En büyük değişim, ağırlıkça %0.5 oranında karbon nanotüp ilave edilerek üretilen kompozit malzemede gözlemlenmiştir. Ancak, %1 ve %1.25 karbon nanotüp içeren örneklerde homojen bir karışım elde edilememesi nedeniyle topaklanma meydana gelmiştir ve buna bağlı olarak elastisite modülleri sırasıyla yaklaşık %3 ve %6 oranında azalmıştır.



Şekil 2.8: Karbon Nanotüp İlavesinin Çekme Dayanımına Etkisi (Öner vd. 2017)

Aynı şekilde Öner vd. (2017) tarafından eğilme modülleri ve eğilme dayanımları incelendiğinde ise ağırlıkça % 0,75 oranında karbon nanotüp içeren numunelerde en fazla artış gerçekleştiği gözlemlenmiş olup, Şekil 2.9'de de görüldüğü üzere eğilme dayanımları katkısız numunelerde 656 MPa iken, % 0,75 KNT katkılı numunelerde 808 MPa olarak ölçülmüştür. Ancak, % 1 karbon nanotüp içeren numunelerde eğilme modülü ve eğilme dayanımlarında katkısız numunelere oranla azalma meydana gelmiş olup, Öner vd. (2017) tarafından bu durum artan karbon nanotüp miktarıyla birlikte topaklanmaların başlaması ve kuvvetin homojen dağılamamasına bağlı olarak gevrek kırılmanın meydana gelmesi şeklinde yorumlanmıştır.



Şekil 2.9: Karbon Nanotüp İlavesinin Eğilme Dayanımına Etkisi (Öner vd. 2017)

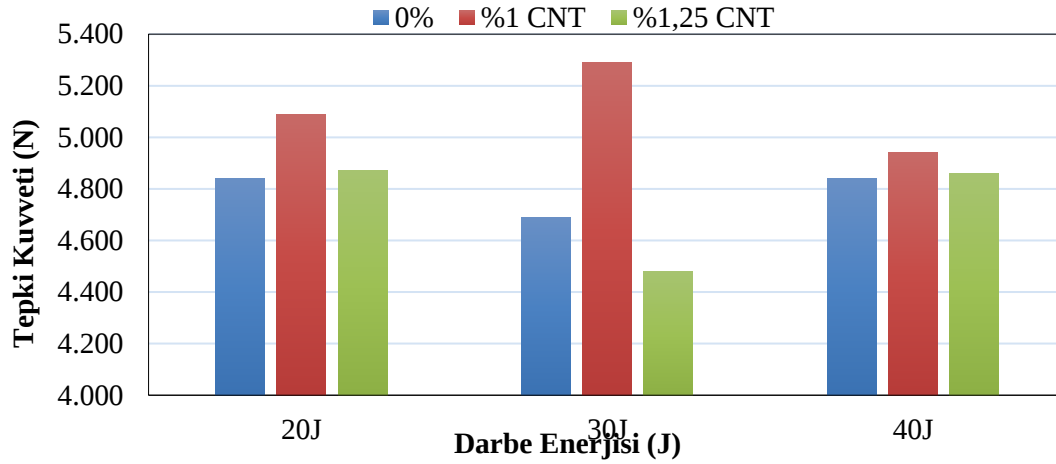
Diğer taraftan Öner vd. (2017) tarafından aynı çalışmada yapılan dinamik mekanik analizlerde ise, tüm numunelerde sıcaklık artışıyla depolanan modül miktarının düştüğü ve cam-sı geçiş sıcaklığındaki en fazla artışın ağırlıkça %0,5 karbon nanotüp içeren numunelerde olduğu tespit edilmiştir.

Yürütülen başka bir çalışmada Böger vd. (2010) tarafından E-cam/epoksi kompozitlerin yorulma davranışlarını artırmak için epoksi içerisine %0,3 oranında karbon nanotüp ilavesi ile kompozit malzemenin yorulma dayanımında belirgin bir şekilde artış olduğu ve aynı zamanda elyafların kırılma dayanımının %16 oranında iyileştiği tespit edilmiştir. Üzümcü (2017) tarafından ise farklı oranlarda karbon nanotüp katkılı woven örgülü E-

cam/epoksi kompozit plakaların darbe davranışlarının deneysel olarak incelendiği bir çalışma yürütülmüştür. KNT etkisinin daha iyi anlaşılması amacıyla %0,5, %1 ve %2 nano karbon karıştırma oranlarında numuneler üretilmiş ve söz konusu numuneler katkısız numunelerle darbe dayanımları açısından karşılaştırılmıştır. Üzümcü (2017) tarafından elde edilen sonuçlar, kritik enerji seviyesinin altında ve üstünde kompozit numunelerin farklı darbe karakteristiklerini gösterdiğini ortaya koymuş ve karbon nanotüp katkılı kompozit levhaların düşük darbe enerjilerinde katkısız numunelere göre daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir.

Diğer taraftan Öner vd. (2016) tarafından farklı oranlarda karbon nanotüp katkılı düz örgü cam/epoksi tabakalı kompozitlerin darbe cihazı ile düşük hızlı darbeye karşı verdiği tepki incelenmiştir. El yatırması yöntemi kullanılarak üretilen nanokompozit plaklarda karbon nanotüp katkısının darbe tepkisi üzerindeki etkisinin araştırılması için epoksi reçine içerisine ağırlıkça %1 ve %1,25 oranlarındaki KNT takviye edilmiştir. Öner vd. (2016) takviye edilen karbon nanotüplerin epoksi reçine içerisinde topaklanmalar olmadan homojen bir şekilde dağılmasını sağlamak amacıyla karıştırma işlemini ultrasonik karıştırıcı kullanarak yapmıştır. Hazırlanan nanokompozit plakların düşük hızlı darbe tepkileri karşılaştırılmış ve darbe deneyi sonrası hasar alanı üzerinde KNT takviyesinin etkisi incelenmiştir.

Öner vd. (2016) tarafından yapılan darbe testi sırasında geri tepme, penetrasyon ve delinme eşiklerini belirlemek için 20, 30, 35 ve 40 J darbe enerjileri kullanılmıştır. Epoksi matris içerisine eklenen karbon nanotüpler, düz örgü cam/epoksi kompozitlerin düşük hızlı darbe tepkilerinde değişikliğe neden olmuştur. Elde edilen sonuçlarda farklı oranlarda KNT katkılı numunelerin katkısız numuneye göre daha büyük hasar alanına ve daha büyük penetrasyon eşik enerjisine sahip olduğunu gözlemlenmiştir. Cam elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozitlerde farklı darbe enerjisi seviyeleri için KNT'lerin etkisini gösteren Şekil 2.10'da da görüldüğü üzere en yüksek reaksiyon kuvveti ağırlıkça %1 karbon nanotüp içeren numunelerden elde edilmiştir. Diğer taraftan Öner vd. (2016) tarafından ağırlıkça %1,25 KNT içeren numunede ise reaksiyon kuvvetinin azalmasının nedeninin yetersiz karıştırma süresi ve topaklanmadan kaynaklandığı değerlendirilmiştir.



Şekil 2.10: Karbon Nanatüp Takviyesinin Darbe Enerjisine Etkisi (Öner vd. 2016)

2.6.3.4 Titanyum Karbür Kullanımının Etkilerinin İncelenmesi

Nanopartikül takviyesinin epoksi matrisli kompozit malzemelerin mekanik ve balistik performansları üzerindeki etkilerinin incelenmesi için kullanılan nano takviyelerden bir diğeri de Titanyum Karbür (TiC) takviyesidir. Literatürde TiC için yukarıda bahsedilen nano kil, nano karbon, grafen vb. nanopartikül takviyelerine oranla daha az çalışma yürütüldüğü ve bu konuda belirli bir boşluk olduğu tespit edilmiştir.

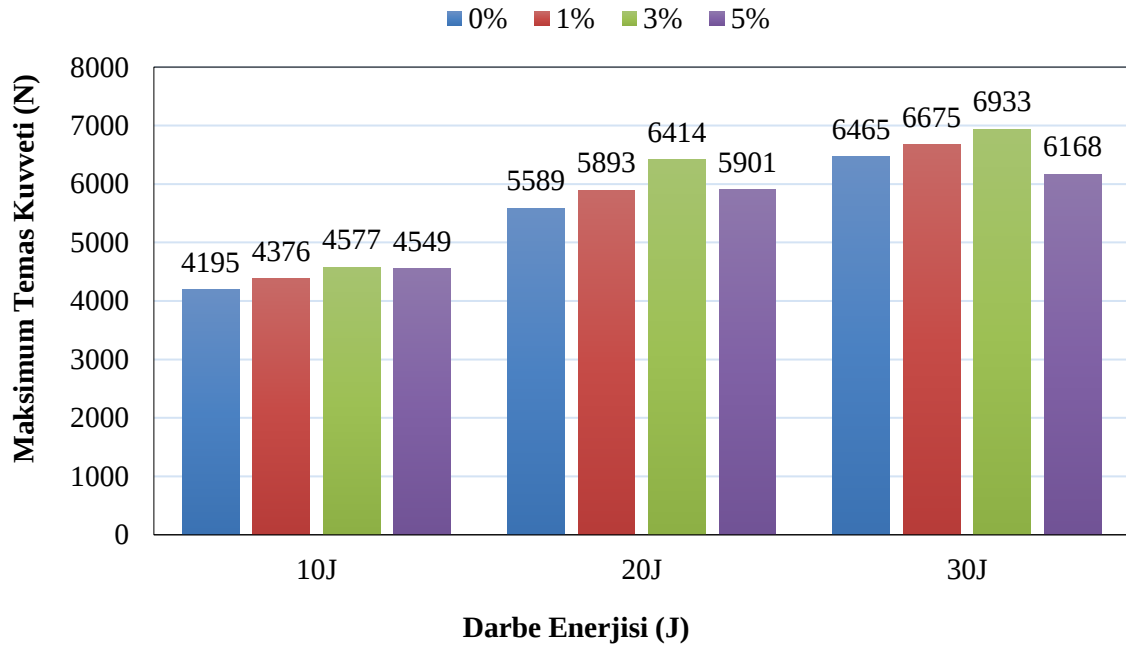
Usal vd. (2020), nanopartikül ilavesinin polimer matrisli aramid fiber- cam elyaf takviyeli hibrit kompozitin mekanik özelliklerine etkisini tespit etmeyi amaçladıkları bir çalışma yürütmüştür. Çalışmalarında takviye malzemesi olarak epoksi-sertleştirici ağırlıkları toplamının %1-3-5'i kadar TiC nanopartikülü kullanılmışlardır. Numunelerin hazırlanmasına yönelik olarak reçinenin hazırlanma aşamasında TiC partiküllerinin epoksi içerisine homojen olarak dağılması için mekanik karıştırıcı kullanmışlardır. El yatırma yöntemi uygulanarak hazırladıkları plakaları epoksi reçinenin kürlenmesi için oda şartlarında 2 saat kadar bekletildikten sonra 12 saatlik vakum infüzyon işlemine tabi tutmuşlardır.

Farklı karışım oranlarında eklenen TiC takviyeli hibrit kompozit plakalara yapılan mekanik ve darbe testleri sonucunda Çizelge 2.5 ve Şekil 2.11'de görüldüğü üzere Usal vd. (2020) %3 ağırlıkça TiC takviye edilmiş kompozit plakalarda saf kompozit plakaya göre elastisite modülünde %15 oranında iyileşme ve darbe direncinde %6 oranında daha fazla enerji absorplama görüldüğünü tespit etmişlerdir. Elde edilen sonuçlar neticesinde

Usal vd. (2020) tarafından reçine içerisine ilave edilen TiC partiküllerinin homojen olarak dağılması ve topaklanma olayının minimum oranına düşmesi için mekanik karıştırıcı yerine ultrasonik karıştırıcı ile karıştırılma işleminin yapılması ile daha iyi sonuçlar elde edileceği değerlendirilmiştir.

Çizelge 2.5: TiC Takviyesinin Elastisite Modülüne Etkisi (Usal vd. 2020)

S.Nu.	Numune	Elastisite Modülü (MPa)
1	%0	6.970
2	%1 TiC	7.225
3	%3 TiC	7.998
4	%5 TiC	6.827



Şekil 2.11: TiC Takviyesinin Darbe Direncine Etkisi (Usal vd. 2020)

Mohaparta vd. (2014) tarafından yürütülen çalışmada e-cam elyaf takviyeli epoksi reçine ve TiC parçacıklarından oluşan çok-fazlı bir kompozitin işlenmesini ve kompozitin katı parçacık erozyon davranışında meydana gelen değişimi incelenmiştir. TiC partikül

oranının ağırlıkça % 0, %10, %15 ve %20 olarak artması ile sertlik değerini 29'dan 53 HV'ye yükseldiği ve erozyon aşınma davranışlarında da ciddi bir oranda iyileşme olduğu gözlenmiştir.

Diğer taraftan Ali (2016) TiC içeriğinin kompozitlerin mekanik ve tribolojik davranışları üzerindeki etkisine odaklanarak, Epoxy-TiC kompozitlerinin sentez ve karakterizasyonunu daha iyi anlamayı amaçladıkları bir çalışma yürütmüşlerdir. Çalışmalarında Titanyum Karbür ile güçlendirilmiş epoksi matrisli kompozitler sentezleyerek mekanik özellikleri inceleyen Ali (2016), takviye malzemesi olarak ağırlıkça %0, %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında TiC tozu epoksi matrise ilave etmişlerdir. Numunelerin hazırlanma sürecinde epoksi matris ve farklı karışım oranlarındaki TiC tozunu mekanik karıştırıcı kullanarak karıştırmışlardır.

Yaptıkları çalışmada kompozitlerin mekanik ve tribolojik davranışlarında belirgin bir iyileşme olduğunu gösteren sonuçlar elde etmişlerdir. TiC tozu oranı arttıkça sertlik, darbe dayanımı, çekme dayanımı ve aşınma oranı gibi özelliklerde de artış olduğunu gözlemleyen Ali (2016) sertlik ve çekme dayanımı değerlerinin Çizelge 2.6'da görüldüğü üzere en fazla ağırlıkça %15 oranında TiC tozu ilavesiyle arttığını tespit etmiştir. Yaptıkları deneylerde ağırlıkça %20 ve %25 TiC içeren numunelerde TiC partiküllerinin aglomerasyonu ve gözenekliliği nedeniyle, sertlik ve çekme dayanımı değerleri azalmalar olduğunu tespit etmişlerdir.

Çizelge 2.6 TiC Takviyesinin Çekme Mukavemetine Etkisi (Ali 2016)

S.Nu.	Numune	Çekme Mukavemeti (MPa)
1	%0 TiC	28,413
2	%5 TiC	29,688
3	%10 TiC	31,178
4	%15 TiC	35,024
5	%20 TiC	30,385
6	%25 TiC	26,995

Diğer taraftan en yüksek darbe dayanımının ise TiC oranının ağırlıkça %20 olduğu numunelerde gözlemlenmiştir. Ayrıca aşınma davranışını da farklı kayma mesafeleri üzerinde test ederek inceleyen Ali (2016) ağırlıkça %10 TiC tozu içeren numunelerde aşınma oranında büyük bir iyileşme gözlemlenmiştir.



3. MATERYAL ve METOT

3.1 Kullanılan Malzemelerin Belirlenmesi

Aramid takviyeli epoksi matrisli kompozit plakalarda TiC nanopartikülünün katkısı ile mekanik özellikler ve balistik performansta meydana gelen değişimin incelenmesi için hazırlanan numune plakalarda aşağıdaki maddelerde yer alan malzemeler kullanılmıştır.

3.1.1 Aramid Esaslı Balistik Kumaş

Nanopartikül takviyesinin balistik performans ve mekanik özelliklere olan etkilerinin incelenmesi için hazırlanan plaklarda katkılı ve katkısız reçine el yatırması yöntemi ile uygulandığından balistik kumaş tercihi de el yatırmasına uygun bir kumaş olarak seçilmelidir. Bu maksatla dokusuz yüzey olan UHMWPE kumaşlarına hazırlanan karışımın fırça yardımı ile sürülmesi ile yüzeyde gözenekler olmadığından kumaş katmanları yeteri kadar ıslatılamayacağı için, literatürde de yer alan araştırmalarda en çok tercih edilen ve dokuma yöntemi ile üretildiğinden gözenekler arasındaki boşluklara sürülen epoksi karışımının emilmesi imkanı olduğundan kumaş katmanlarında daha fazla ıslanmaların olacağı değerlendirilen aramid esaslı balistik kumaş tercih edilmiştir.

Aramid esaslı balistik kumaşlar, kullanıldığı yere göre farklı formlarda olabilmektedir. Örnek olarak yumuşak zırh olarak tabir edilen ve balistik koruyucu yeleklerde vücudu saran bölgelerde mermi ve parçacık tesirine karşı koruma sağlamak maksadıyla kullanımında teçhizatı kuşanan personelin hareket kabiliyetini artırmak maksadıyla kevlar liflerinden dokunmuş aramid kumaşlar herhangi bir presleme işlemine tabi tutulmadan üst üste konulup dikilerek kullanılmaktadır. Diğer taraftan, balistik kompozit başlık, balistik kalkan, sert vücut zırhı vb. üretimlerinde kullanılan aramid esaslı balistik zırh kumaşlarında ise bir tarafında prepreg formda reçine filmi yer almaktadır. Söz konusu prepreg reçineli aramid kumaşlar üst üste konularak sıcak presleme yöntemi ile sabit basınç ve sıcaklık altında kürlenerek uygun kalıplar ile istenilen şekil verilerek kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasında Kordsa Teknik Tekstil A.Ş.'nin 400 g/m² ağırlığına sahip plain dokuma aramid esaslı zırh kumaşı kullanılmıştır. Söz konusu kumaşın tek tarafı fenolik reçineli prepreg formu balistik kompozit başlık imalatında kullanılmakta olup, bu çalışma için reçine el yatırması ile takviye edileceğinden prepreg olmayan formu tercih edilmiştir.

3.1.2 Epoksi Reçine

Aramid esaslı balistik zırh kumaşlarının üst üste getirilerek sıcak pres altında sabit sıcaklık ve basınç ile balistik plaka haline getirilmesi için gerekli olan matris malzemeleri olarak epoksi reçine tercih edilmiş olup, bu tez çalışmasında epoksi reçine olarak Apox Kimya firmasına ait Apox Ultra 9019 model epoksi reçine kullanılmıştır.

3.1.3 Nanopartikül Takviyesi

Literatürde nanopartikül takviyesinin eğilme dayanımı, çekme dayanımı, darbe dayanımı vb. mekanik özellikler, ısı iletkenlik, elektriksel iletkenlik vb. fiziksel özellikler ile balistik performansa etkilerinin incelendiği çalışmalar incelendiğinde, matris malzemesi içerisine takviye edilerek yapının özelliklerinde iyileştirme meydana getirilmesi maksadıyla çok farklı nanopartikül takviyesini kullanıldığı gözlemlenmiştir.

Elektriksel iletkenlik gibi fiziksel özelliklerin yanı sıra mekanik özellikler ve balistik performanslarda nanopartikül takviyesinin etkilerinin incelendiği çalışmalarda ağırlıklı olarak nanokil, grafen ve karbon nanotüp kullanıldığı ve söz konusu malzemelere yönelik oldukça fazla çalışma olduğu yapılan literatür taramasında tespit edilmiştir (Fan vd. 2008). Ancak bahse konu özelliklerde nanopartikül takviyesinin etkilerinin araştırıldığı çalışmalarda nano silika hatta hindistan cevizi kabuğu tozu vb. alternatif katkı maddelerinin kullanıldığı çalışmalar arasında TiC nanopartikülünün kullanımının yaygın olduğu ancak literatürde yeterli sayıda çalışma olmadığı tespit edilmiştir.

TiC nanopartikülün mekanik ve balistik özelliklere etkilerine yönelik literatürde yeterli seviyede çalışma olmadığından, söz konusu eksikliğin giderilmesine yönelik olarak bu tez çalışmasında nanopartikül takviyesi olarak Nanokar Nanoteknoloji firmasının 12070-08-5 CAS numaralı %99,9 saflıktaki TiC tozu tercih edilmiştir.

3.2 Numunelerin Hazırlanması

Aramid takviyeli epoksi matris kompozit plakalarda matris malzemesi olan epoksi içerisine TiC nanopartikülü takviye edilmesi ile mekanik özellikler ve balistik performansta meydana gelen değişimlerin incelenmesi maksadıyla çekme deneyi, 3 nokta eğme deneyi ve balistik testlerde kullanılan numuneler aşağıda belirtilen esaslarda hazırlanmıştır.

İlk olarak aramid esaslı zırh kumaşı otomatik serim kesim makinasına yatırılarak 25x25 cm ebatlarında parçalar halinde kesilmiştir. Kesilen parçalar el yatırmasında kullanılmak üzere üst üste istiflenmiştir.



Resim 3.1: Aramid Esaslı Zırh Kumaşı

Üretilen numunelerde saf epoksili olan plakalarda epoksi reçine ve 4:1 karışım oranında sertleştirici karıştırılarak kullanılmıştır. Diğer taraftan, TiC nanopartikülü takviyesi olan plakalarda epoksi reçine içerisine takviye edilen TiC tozu miktarı ağırlıkça takviye oranına göre belirlenerek epoksi reçine içerisine katılmış ve homojen bir dağılım sağlanması maksadıyla BIOBASE markasına ait ultrasonik karıştırma cihazı ile karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Ultrasonik karıştırma esnasında yapı içerisinde meydana gelen titreşimler ile epoksinin aşırı ısınmasının önüne geçilmesi maksadıyla 5 saniye karıştırma 5 saniye durma yöntemi kullanılarak toplamda 10 dakika süre ile karıştırma işlemi yapılmıştır. Aynı zamanda karıştırma işlemi esnasında epoksi reçinede meydana gelen sıcaklık değişiminin takip edilebilmesi için prob yardımı ile epoksi reçinenin anlık sıcaklık değeri takip edilerek, ultrasonik karıştırma cihazına limit olarak girilen 60 °C değerinin altında kaldığından emin olunmuştur.

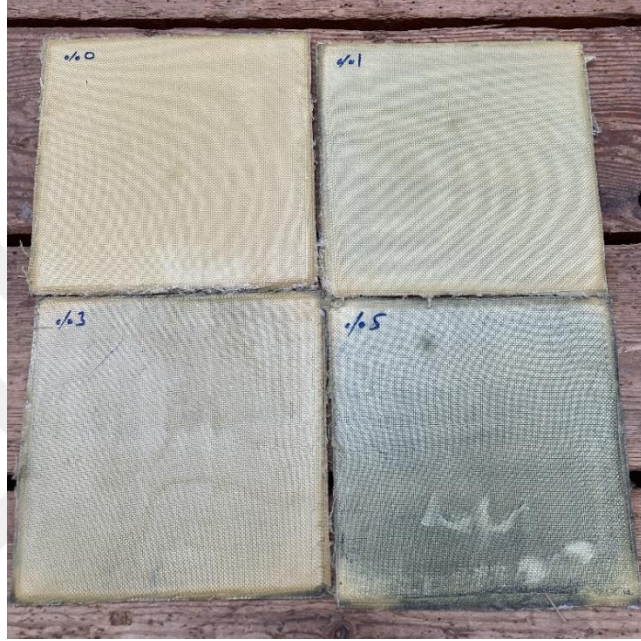


Resim 3.2: Ultrasonik Karıştırma Makinası

Mekanik özelliklerin belirlenmesi için yapılan çekme ve 3 nokta eğme testleri ve balistik testlerde kullanılan numunelerde kesilmiş aramid esaslı kumaşlara saf epoksi veya TiC nanopartikül takviyeli epoksi reçinenin lamine edilmesi el yatırması yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Aramid esaslı zırh kumaşı katmanları üzerine fırça yardımıyla sürülen epoksi reçine karışımları üst üste istenilen katman sayısında dizilerek plaka haline getirilmiştir. Mekanik testlerde kullanılacak olan plakalar 11 katmanlı olarak, balistik testlerde kullanılacak olan plakalar ise balistik testlerde elde edilen sonuçlara göre belirlenen kat sayısında hazırlanmıştır.

El yatırması yöntemi ile hazırlanan plakaların kürlenmesi ve reçinenin her bölgeye eşit dağılımının sağlanması maksadıyla 100 °C alt ve üst tabla sıcaklığına sahip sıcak pres yardımıyla ile sabit 150 ton altında 15 dakika süre ile sıcak presleme yöntemi uygulanmıştır. Sıcak preslemede kürlenme süresinin sonunda presten alınan plakalar oda sıcaklığında soğumaya bırakılarak kürlenmenin tamamlanması beklenilmiştir.

Sıcak presleme sonrasında 24 saat süre ile oda şartlarında soğumaya bırakılarak kürlenme reaksiyonunun tamamlanması beklenen plakaların kenarlarında oluşan epoksi fazlalıkları kesici bıçak yardımıyla temizlenmiştir. Mekanik özelliklerin belirlenmesinde kullanılacak olan numuneler standartlara uygun ölçülerde şerit testere yardımıyla kesilmiş, balistik atışlarda ise direkt 25x25 cm ebatlarındaki plakalara atış yapılmıştır.



Resim 3.3: Sıcak Presleme Sonrasında Elde Edilen Plakalar

3.3 Mekanik Testlerin Yapılması

Epoksi matrisli aramid plakalarda matris malzemesi içerisine TiC nanopartikülünün takviye edilmesi ile kompozit plakaların mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimin incelenmesi amacıyla mekanik özelliklerin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan çekme testi ve 3 nokta eğme testleri yapılmıştır.

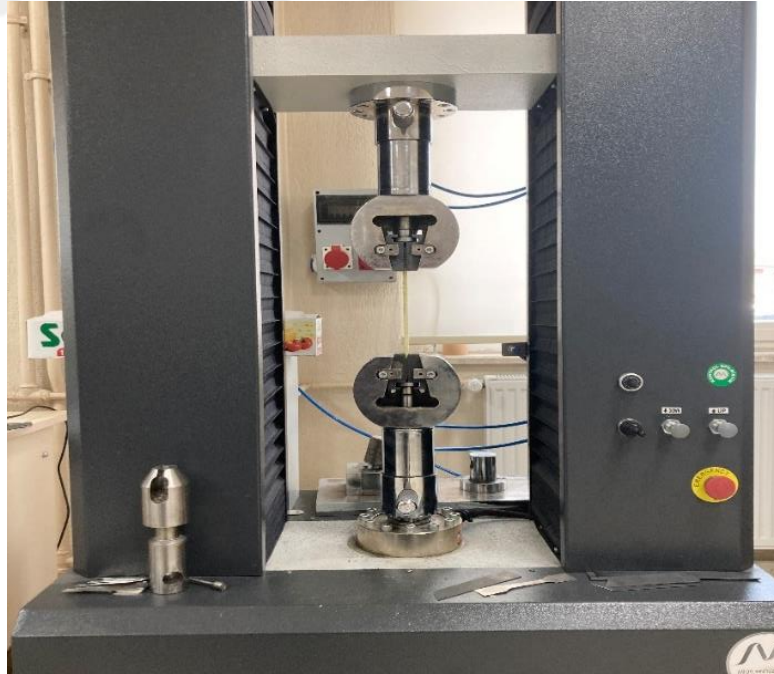
3.3.1 Çekme Testi

TiC nanopartikülün çekme dayanımı ve elastisite modülüne olan etkisinin incelenmesi için ASTM D3039 standardında yapılan çekme testinde Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji Malzeme Mühendisliği laboratuvarında yer alan Microanaliz Makina ve Test Cihazları markalı 100 kN kapasiteli çekme-basma cihazı kullanılmıştır. Deney numuneleri standartta yer alan Tablo 2'deki fiberlerin dengeli ve

simetrik dağıldığı türe göre bütün plakadan 25 x 250 mm ebatlarında kesilmiştir.



Resim 3.4: Çekme Testinde Kullanılan Numuneler



Resim 3.5: Çekme Test Cihazı

3.3.2 3 Nokta Eğme Testi

TiC nanopartikülün eğilme dayanımı ve eğilme elastisite modülü üzerindeki etkilerinin incelenmesi için ASTM D790 standardında yapılan 3 nokta eğme deneyinde Afyon Kocatepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği laboratuvarında yer alan Shimadzu markalı 100 kN kapasiteli cihaz kullanılmıştır. Deney numuneleri standartta yer alan madde 7.5’de belirtilen kalınlığın 3,2 mm’den büyük olduğu yüksek mukavemetli numuneler için belirtilen oranlarda bütün plakadan 35 x 180 mm ebatlarında kesilmiştir.



Resim 3.6: 3 Nokta Eğme Test Cihazı

3.4 Balistik Testlerin Yapılması

Aramid takviyeli epoksi matrisli balistik zırh plakalarında epoksi matris içerisine takviye edilen TiC nanopartikülünün balistik performansa olan etkilerinin incelenmesi amacıyla yapılan balistik testler TÜRKAK TS EN ISO/IEC 17025 standardı kapsamında akredite bir laboratuvar olan MSB 8’inci Ana Bakım Fabrika Müdürlüğü Balistik Test ve Analiz Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

Balistik testlerde NIJ 0101.04 standardında Seviye III-A'ya karşı koruma sağlanıp sağlanmadığının denenmesi maksadıyla 9 mm FMJ RN mühimmatı ile 5 metre mesafeden $436\pm9,1$ m/sn hız limitlerinde delinme testi uygulanmıştır. Bazı durumlarda balistik limitlerin belirlenebilmesi maksadıyla plakalardaki belirli atışlar farklı hız değerlerinde de yapılmıştır.



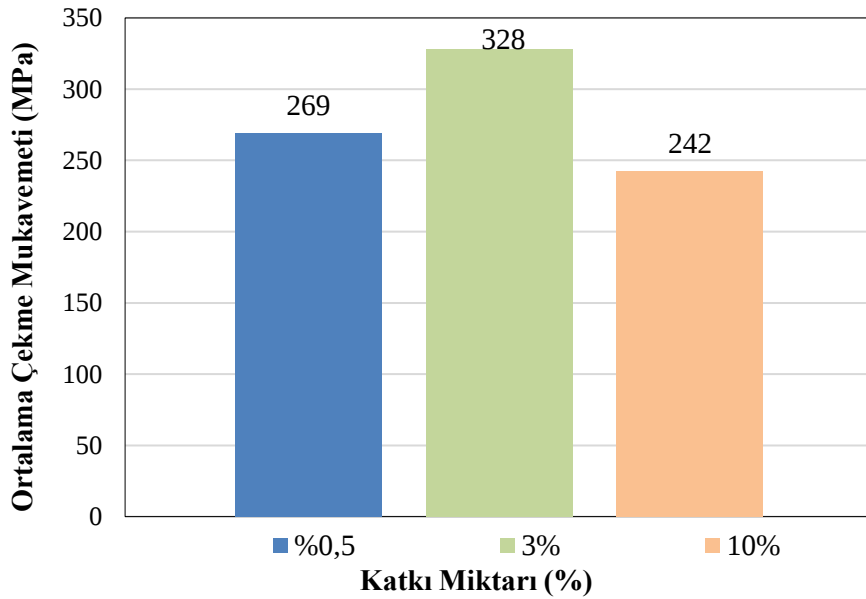
Resim 3.7:Atış Düzeneği

4. BULGULAR

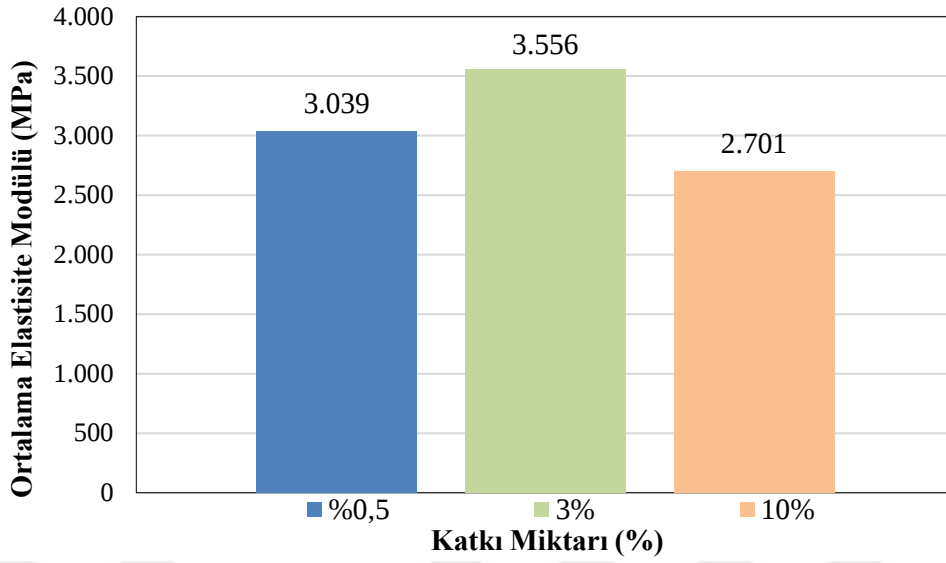
4.1 Nanotoz Takviyesinin Çekme Dayanımına Olan Etkisi

Nanotoz olarak tercih edilen TiC ilavesinin aramid takviyeli epoksi matris kompozit numunelerinin mekanik özelliklerine etkisinin incelenmesi maksadıyla çekme testi yapılmıştır. Literatürde TiC partikülünün çok farklı karıştırma oranlarında uygulaması olduğundan ilk olarak optimum karışım oranının belirlenmesi maksadıyla epoksi-sertleştirici toplam ağırlığının ağırlıkça %0,5, %3 ve %10'u karışım oranlarına sahip numuneler hazırlanarak çekme testi yapılmıştır. Yapılan testte elde edilen değerlerin ortalaması olan ortalama çekme mukavemeti ve ortalama elastisite modülü değerlerine ait grafikler Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de gösterilmiştir.

Sonuçlar incelendiğinde ortalama çekme mukavemeti ve ortalama elastisite modülü değerlerinde en yüksek sonucun ağırlıkça %3 TiC katkılı numunelerde, en düşük sonucun ise ağırlıkça %10 takviyeli numunelerde elde edildiği gözlemlenmiştir. Bu sebeple TiC katkısının etkilerinin incelenmesi için kullanılacak olan karıştırma oranları en iyi sonucun elde edilmiş olduğu ağırlıkça %3 karıştırma oranına yakın değerler olan %1, %3 ve %5 oranlarında belirlenmiştir.

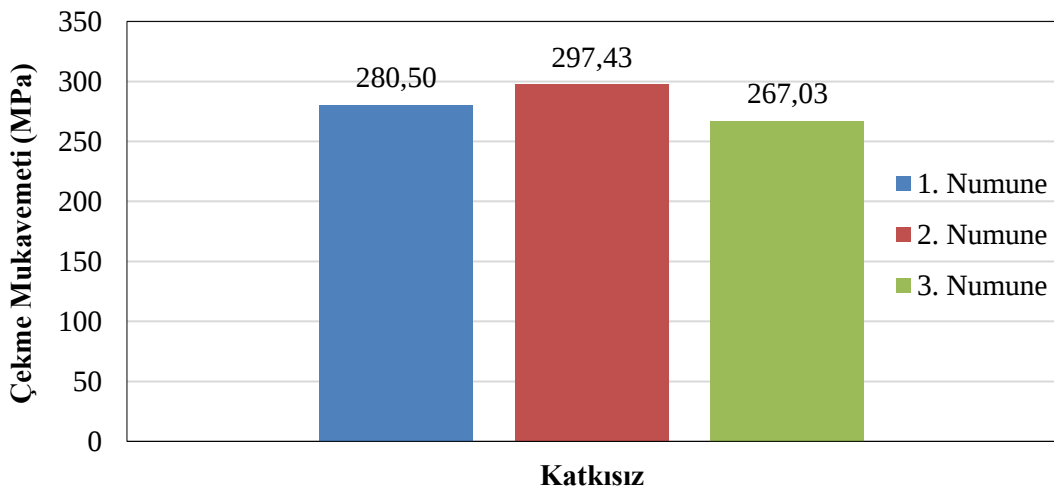


Şekil 4.1: Epoksi Matrisine TiC Takviye Edilmiş Numunelerde Elde Edilen Ortalama Çekme Mukavemeti Değerleri



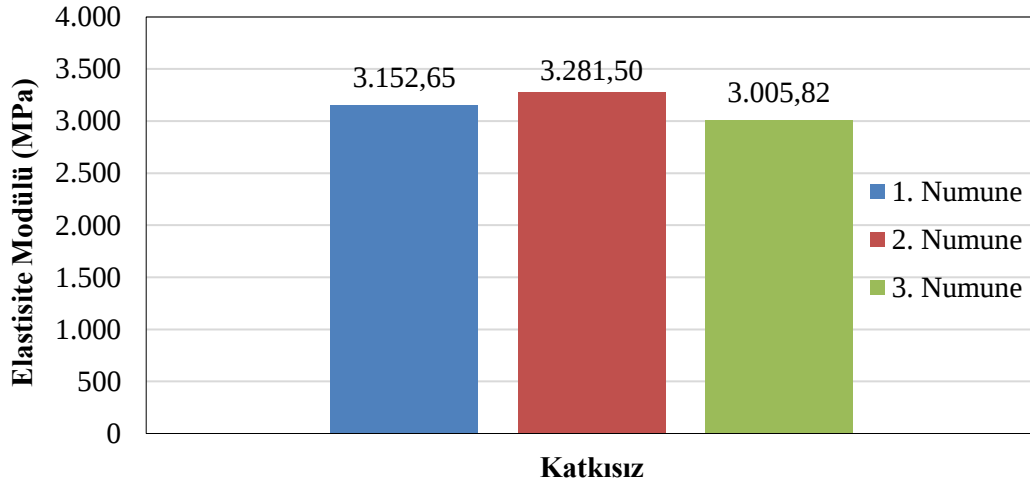
Şekil 4.2: Epoksi Matrisine TiC Takviye Edilmiş Numunelerde Elde Edilen Ortalama Elastisite Modülü Değerleri

TiC katkısının mekanik özelliklere etkisinin belirlenmesi amacıyla hazırlanan katkısız numuneler ve epoksi reçine-sertleştirici ağırlığının ağırlıkça %1, %3 ve %5 karışım oranlarında TiC ilavesi ile hazırlanan kompozit plakalara uygulanan çekme testi sonuçları kıyaslanarak optimum karıştırma oranı belirlenmeye çalışılmıştır. TiC katkısının mekanik özelliklere etkisi belirlenmeden önce nanotoz ilavesi olmayan saf aramid takviyeli epoksi matris kompozit plakalarından elde edilen numunelere çekme testi uygulanmıştır. Uygulanan çekme testi sonucunda elde edilen çekme mukavemeti değerleri Şekil 4.3’de belirtilmiş olup ortalama çekme mukavemeti değeri 281,65 MPa olarak belirlenmiştir.



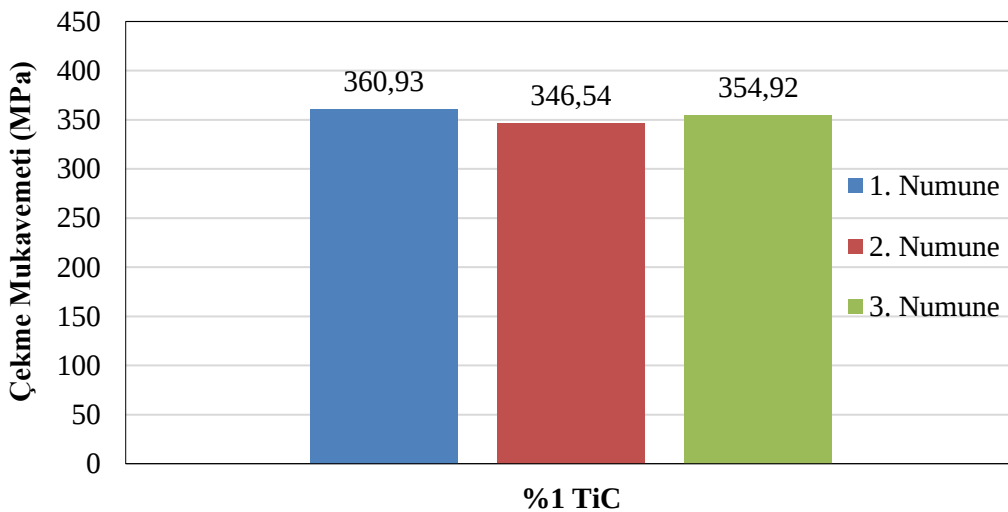
Şekil 4.3: Katkısız Epoksi Matrisli Numunelerin Çekme Mukavemeti

Diğer taraftan katkısız numunelere yapılan çekme testi sonucunda çekme mukavemeti ve birim uzama değerlerine göre hesaplanan elastisite modülleri yer almakta olup, ortalama elastisite modülü 3.146,46 MPa olarak hesaplanmıştır.



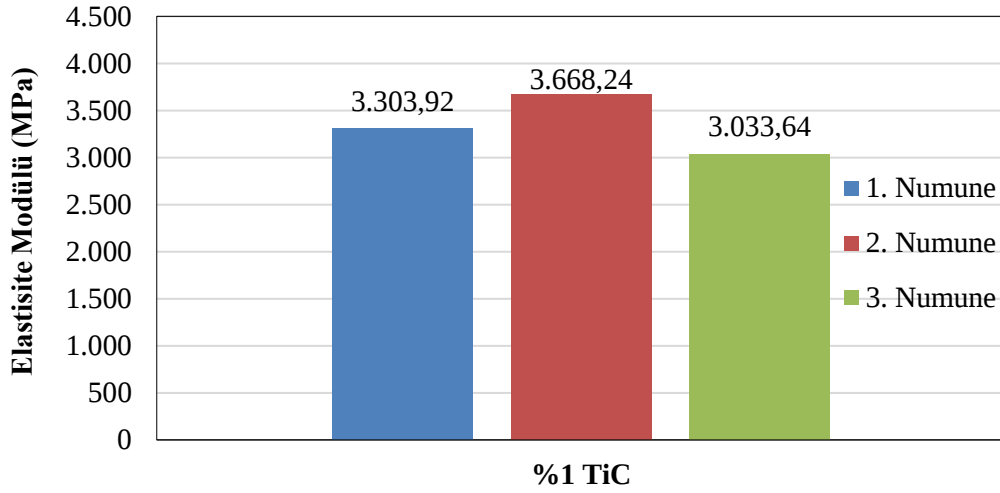
Şekil 4.4: Katkısız Epoksi Matrisli Numunelerin Elastisite Modülü

Epoksi reçine-sertleştirici ağırlığının ağırlıkça %1'i oranında TiC ilavesinin yapıldığı numunelere uygulanan çekme testi sonucunda çekme gerilmesi ve elastisite modülünde artış olduğu gözlemlenmiştir. Epoksi reçine içerisine ağırlıkça %1 oranında TiC takviyesi ile hazırlanan plaklardan elde edilen numunelere yapılan çekme neticesinde elde edilen çekme mukavemeti değerleri Şekil 4.5'de gösterilmiş olup, saf numunelerde 281,65 MPa olan ortalama çekme mukavemeti değerinin %26 artış ile 354,13 MPa olduğu tespit edilmiştir.



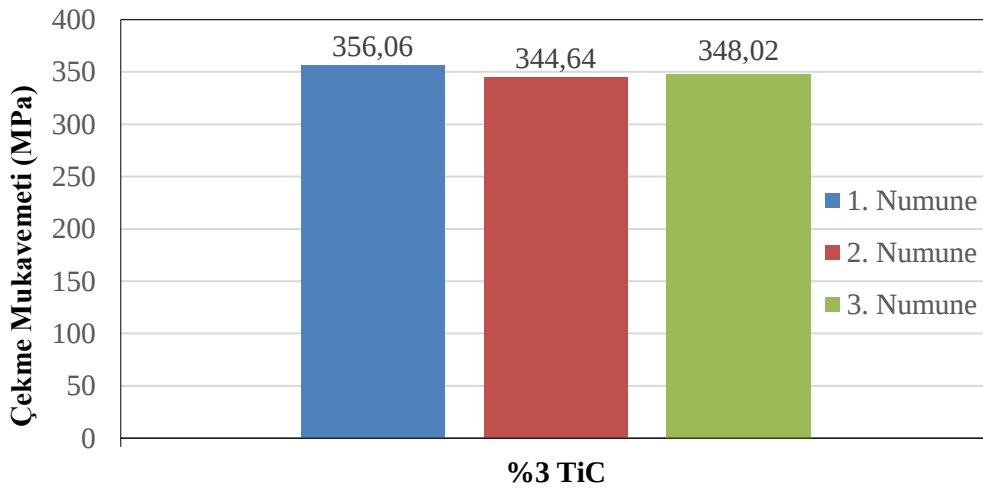
Şekil 4.5: Epoksi Matrisine Ağırlıkça %1 TiC Takviye Edilmiş Numunelerin Çekme Mukavemeti

Aynı şekilde Şekil 4.6’de yer alan elastisite modülü değerleri de incelendiğinde ağırlıkça %1 TiC katkılı numunelerde elde edilen ortalama elastisite modülünün 3.335,27 MPa olduğu belirlenmiştir. Epoksi içerisine ağırlıkça %1 TiC katkısı saf numunelere oranla ortalama elastisite modülü değerinde %6’lık bir artışa sebep olmuştur.



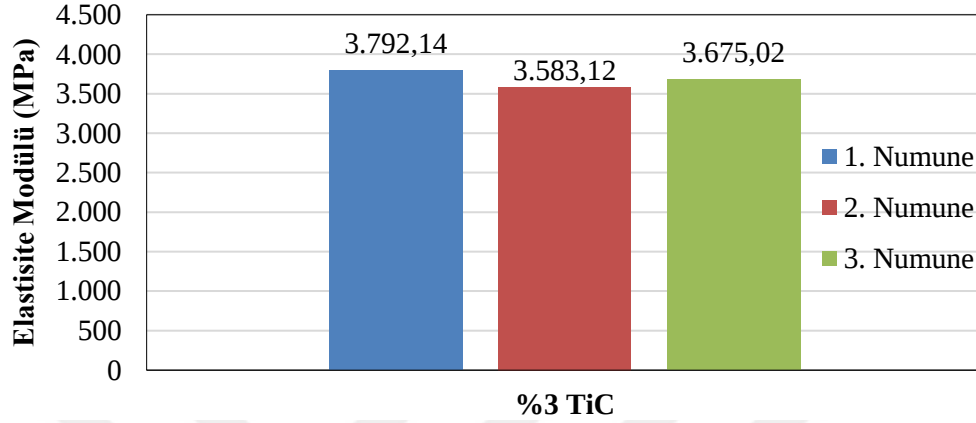
Şekil 4.6: Epoksi Matrisine Ağırlıkça %1 TiC Takviye Edilmiş Numunelerin Elastisite Modülü

Aynı şekilde ağırlıkça %3 TiC takviyeli numunelere yapılan çekme testi sonucunda elde edilen çekme mukavemeti değerleri gösterilmiş olup, ortalama çekme mukavemeti değeri saf numuneye oranla %24’lük bir artış ile 349,57 MPa olarak hesaplanmıştır. Ancak %3 TiC takviyeli numunelerde elde edilen ortalama çekme mukavemeti değeri %1 TiC takviyesinde elde edilen 354,13 MPa değerine oranla yaklaşık olarak %2 seviyelerinde azalmıştır.



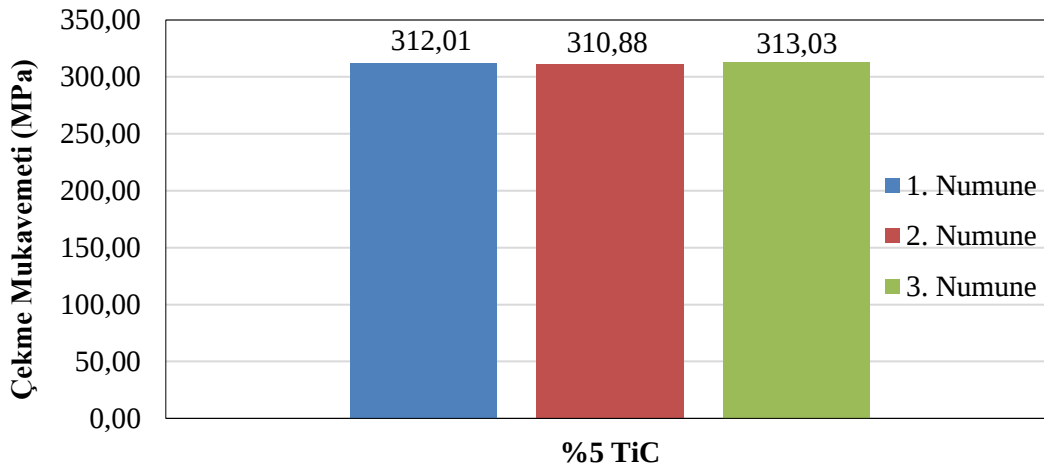
Şekil 4.7: Epoksi Matrisine Ağırlıkça %3 TiC Takviye Edilmiş Numunelerin Çekme Mukavemeti

Elastisite modülleri incelendiğinde ise %3 TiC takviyeli numunelerde elde edilen ortalama elastisite modülü değerinin 3.683,43 MPa olduğu ve değer saf numunelerde elde edilen değerden %17, %1 TiC takveli numunelerde elde edilen değerden ise %11 daha fazla olduğu tespit edilmiştir.



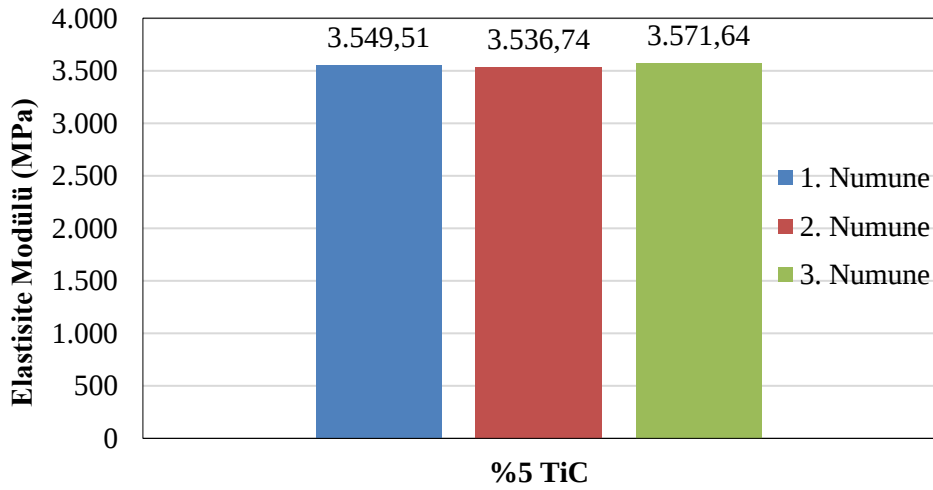
Şekil 4.8: Epoksi Matrisine Ağırlıkça %3 TiC Takviye Edilmiş Numunelerin Elastisite Modülü

Epoksi matris içerisine TiC ilavesinin mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi maksadıyla yapılan çekme testleri sonucunda epoksi reçine-sertleştirici karışımının ağırlıkça %5'i TiC takviyesi olan numunelerde elde edilen çekme mukavemeti değerleri Şekil 4.9'de belirtilmiş olup, ortalama çekme mukavemeti değeri 311,97 MPa olarak hesaplanmıştır. Yapıya ağırlıkça %5 TiC ilavesi ortalama çekme mukavemetinin saf numunelere oranla %11 artmasına sebep olmuştur. Ancak ağırlıkça %5 TiC ilavesi olan numunelerde elde edilen sonuçlar ağırlıkça %1 TiC ve %3 TiC ilaveli numuneler ile kıyaslandığında sırasıyla %12 ve %10'luk bir azalma yaşandığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.9: Epoksi Matrisine Ağırlıkça %5 TiC Takviye Edilmiş Numunelerin Çekme Mukavemeti

Diğer taraftan ağırlıkça %5 TiC takviyesinin elastisite modülüne etkisinin incelenmesi için elde edilen sonuçlar incelendiğinde ortalama elastisite modülünün 3.552,63 MPa olduğu tespit edilmiş olup, katkısız numuneler ve ağırlıkça %1 TiC takviyeli numunelere göre sırasıyla %13 ve %7 artış meydana gelmiştir. Ancak elde edilen ortalama elastisite modülü değerinde ağırlıkça %3 TiC takviyeli numunelerde elde edilen elastisite modülüne (3.683,43 MPa) göre yaklaşık olarak % seviyelerinde azalma meydana gelmiştir.



Şekil 4.10: Epoksi Matrisine Ağırlıkça %5 TiC Takviye Edilmiş Numunelerin Elastisite Modülü

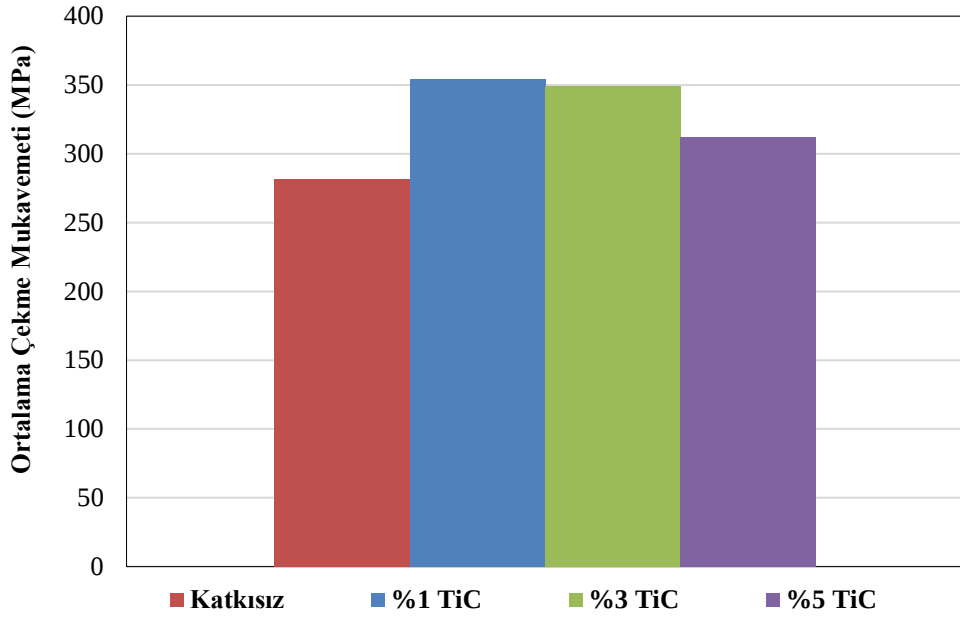
Aramid takviyeli epoksi matris kompozitte epoksi matris içerisine takviye edilen TiC nanotozunun mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için katkısız ve ağırlıkça %1, %3 ve %5 TiC içeren numunelere yapılan çekme testi sonucunda elde edilen sonuçlara yönelik hazırlanan çizelge Çizelge 4.1’de, karşılaştırma grafikleri Şekil 4.11 ve Şekil 4.12 sunulmuştur.

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde TiC katkılı tüm numunelerde saf numunelere oranla çekme mukavemeti ve elastisite modülü değerlerinde artış olduğu tespit edilmiştir. Çekme mukavemetine ilişkin olarak ortalama çekme mukavemeti değerinde en fazla artış ağırlıkça %1 TiC takviyeli numunelerde elde edilmiştir. Ancak ağırlıkça %3 TiC takviyeli numunelerde elde edilen çekme mukavemeti değerleri incelendiğinde de sonuçların ağırlıkça %1 TiC takviyeli numunelerde elde edilen sonuçlara yakın olduğu ancak ortalama çekme mukavemeti değerinin yaklaşık %2 seviyelerinde azaldığı gözlemlenmiştir.

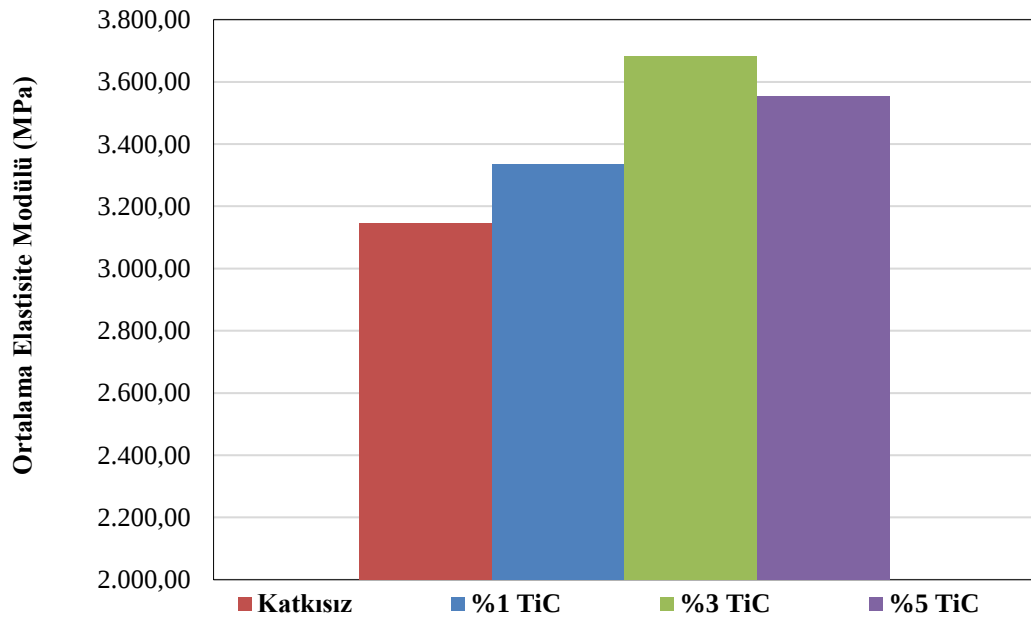
Diğer taraftan elastisite modülleri incelendiğinde ise en yüksek elastisite modülü değerlerinin 3.683,43 MPa ortalama ile ağırlıkça %3 TiC takviyeli numunelerde elde edildiği gözlemlenmiştir. Ancak, epoksi matris içerisinde TiC miktarının artması ile elastisite modülü değerlerinde azalış meydana geldiği tespit edilmiştir.

Çizelge 4.1:Çekme Testi Sonucunda Elde Edilen Çekme Mukavemeti ve Elastisite Modülü Değerleri

S.Nu.	Katkı	Çekme Mukavemeti (MPa)	Ortalama Çekme Mukavemeti (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)	Ortalama Elastisite Modülü (MPa)
1	Katkısız	280,50	281,65	3.152,65	3.146,66
2		297,43		3.281,50	
3		267,03		3.005,82	
4	%1 TiC	360,93	354,13	3.303,92	3.335,27
5		346,54		3.668,24	
6		354,92		3.033,64	
7	%3 TiC	356,06	349,57	3.792,14	3.683,43
8		344,64		3.583,12	
9		348,02		3.675,02	
10	%5 TiC	312,01	311,97	3.549,51	3.552,63
11		310,88		3.536,74	
12		313,03		3.571,64	



Şekil 4.11: Epoksi Matrisine TiC Takviyesinin Ortalama Çekme Mukavemetlerine Etkileri



Şekil 4.12: Epoksi Matrisine TiC Takviyesinin Ortalama Elastisite Modülüne Etkileri

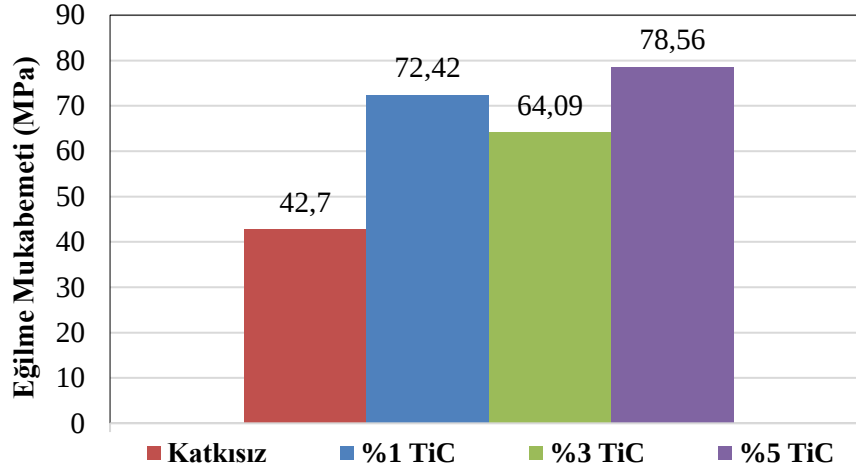
4.2 Nanotoz Takviyesinin Eğilme Dayanımına Olan Etkisi

Aramid takviyeli epoksi matrisli kompozit malzemelerde epoksi matris içerisine takviye edine TiC nanopartiküllerinin mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi amacıyla çekme testlerine ilave olarak 3 nokta eğme testleri yapılmıştır. Yapılan testte TiC nanopartikülünün eğme mukavemeti ve eğilme elastisite modülüne etkilerinin araştırılması için içerisinde herhangi bir katkı bulunmayan saf numuneler ve epoksi-sertleştirici ağırlığının ağırlıkça %1, %3 ve %5'i oranında TiC katkısı bulunan numunelere 3 nokta eğme testi uygulanmıştır.

Epoksi matris içerisine TiC ilavesinin mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi maksadıyla yapılan 3 nokta eğme testleri sonucunda elde edilen değerler Çizelge 4.2 ve Şekil 4.12'da gösterilmiş olup, TiC katkısının olduğu tüm numunelerde saf numuneye oranla eğilme mukavemetinde bir artış gözlemlenmiştir. Söz konusu artış en az %50 oranında bir artış ile ağırlıkça %3 TiC katkılı numunelerde elde edilirken, en fazla artış ise yaklaşık %84 ile ağırlıkça %5 TiC katkılı numunelerde elde edilmiştir.

Çizelge 4.2: Epoksi Matrisine TiC Takviyesinin Eğilme Mukavemetine Etkisi

Numune	Eğilme Mukavemeti (MPa)
Katkısız	42,70
%1 TiC	72,42
%3 TiC	64,09
%5 TiC	78,56

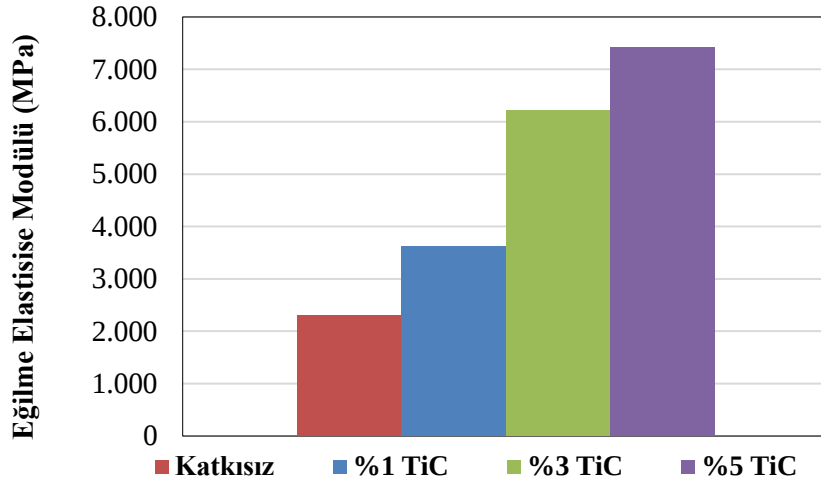


Şekil 4.13: Epoksi Matrisine TiC Takviyesinin Eğilme Mukavemetine Etkisi

Diğer tarafından katkısız ve ağırlıkça %1, %3 ve %5 karışım oranlarına sahip TiC takviyeli numunelere uygulanan 3 nokta eğme testi sonucunda elde edilen eğilme elastisite modülü değerleri Çizelge 4.3 ve Şekil 4.14 gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde tüm karışım oranlarında saf numuneye oranla eğilme elastisite modülünde bir artış olduğu gözlemlenmiştir. Epoksi matris içerisine takviye edilen TiC nanopartiküllerinin eğilme elastisite modülüne olan etkisi en az %58 oranında bir artış ile ağırlıkça %1 TiC takviyeli numunelerde gözlemlenirken, en fazla artış ise yaklaşık %223 oranında bir artış ile ağırlıkça %5 TiC takviyeli numunede elde edilmiştir.

Çizelge 4.3: Epoksi Matrisine TiC Takviyesinin Eğilme Elastisite Modülüne Etkisi

Numune	Eğilme Elastisite Modülü (MPa)
Katkısız	2.295,70
%1 TiC	3.621,00
%3 TiC	6.222,33
%5 TiC	7.411,32



Şekil 4.14: Epoksi Matrisine TiC Takviyesinin Eğilme Elastisite Modülüne Etkisi

4.3 Nanotoz Takviyesinin Balistik Performansa Etkisi

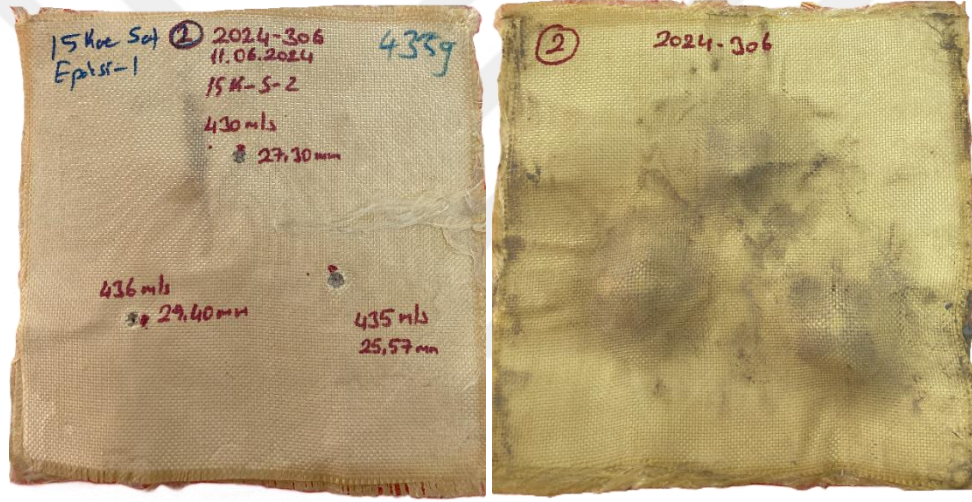
TiC nanopartikülünün aramid takviyeli epoksi matrisli kompozitlerin balistik performansına etkisinin araştırılması amacıyla balistik test gerçekleştirilmiştir. Yapılan testlerde TiC katkısının mekanik özelliklere etkisinin araştırıldığı çekme ve 3 nokta eğme testlerinde en iyi iyileştirmenin meydana geldiği değerlendirilen ağırlıkça %3 ve %5 TiC takviyeli ve saf epoksili kompozit plakalar kullanılmıştır.

TiC katkısının kompozit plakaların balistik performansına olan etkisinin incelendiği balistik testlerde hazırlanan plakalara 9 mm FMJ RN mühimmatı ile atış yapılmış olup, plakaların arka yüzeyinde delinme olup olmadığının ve arka yüzey penetrasyonu olan çöküntü derinliğinin değişimi incelenmiştir. Atış testi sonucunda delinme olmayan ve arka yüzey penetrasyonuna bağlı destek macununda oluşan çöküntü derinliği 44 mm'den az olan numuneler “uygun” olarak değerlendirilmiş, delinme olan veya delinme olmadığı halde çöküntü derinliği 44 mm'den fazla olan numuneler ise “uygun değil” olarak tanımlanmıştır.

Epoksi matris içerisine takviye edilen TiC nanopartikülünün mekanik özelliklerde meydana getirdiği iyileştirme gibi aramid esaslı zırh kumaşının balistik performansında iyileştirme meydana getirip getirmeyeceğinin belirlenmesinden önce aramid takviyeli katkısız epoksi matrisli kompozit plakaların balistik sınırının belirlenmesi gerekmektedir.

Bu maksatla saf epoksinin el yatırması ile 17 kat aramid kumaşa sürülmesi ile hazırlanan numune plakaya yapılan balistik test sonucunda delinme meydana gelmemiş ve çöküntü derinlikleri üst sınırın altında kalmıştır.

Saf epoksili numunelerde balistik sınırın belirlenebilmesi için 17 katlı aramid plakada uygun sonuç elde edildiğinden kat sayısında azaltma yapılmış olup, 15 katlı aramid plaka üretilerek balistik teste tabi tutulmuştur. NIJ 0101.04 standartında Seviye III-A tehdit seviyesine ait hız olan $436 \pm 9,1$ hız aralığında atışlar yapılan plakada Resim 4.1’de görüldüğü üzere herhangi bir delinme olmamış olup, çöküntü değerlerinde de uygun sonuçlar elde edilmiştir.



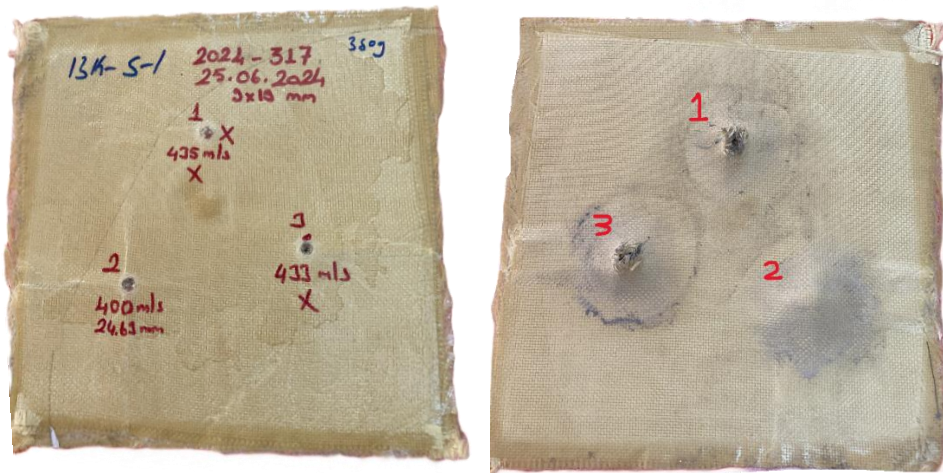
Resim 4.1: 15 Katlı Saf Epoksi Reçineli Plakanın Atış Sonrası Ön ve Arka Yüzeyi

Diğer taraftan, aramid esaslı zırh kumaşlarında epoksi reçine kullanımının balistik performansa etkisinin gözlemlenmesi maksadıyla 15 katta saf epoksi kullanımı ile uygun sonuçlar elde edilen plaka ile epoksisiz 15 kat aramid üst üste dikilerek atış yapılmıştır. NIJ 0101.04 Seviye III-A’ya karşılık gelen hızlarda 439 m/sn ile yapılan atışlarda herhangi bir delinme yaşanmamış olup, çöküntü değerleri ilk atışta 40,06 mm ile sınıra yakın, ikinci atışta 46,66 mm ile sınırın üstünde olduğundan uygun değil olarak sonuçlanmıştır.



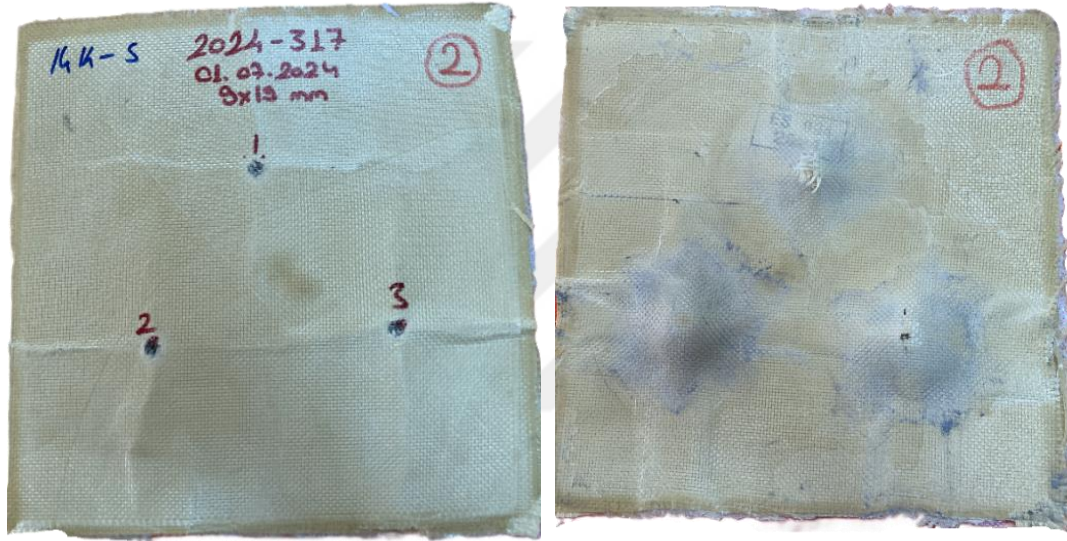
Resim 4.2: 15 Kat Epoksisiz Aramid Plakanın Atış Sonrası Ön ve Arka Yüzeyi

Takviyesiz numunelerde balistik sınırın belirlenebilmesi için tekrardan kat azaltımı yapılarak 13 katlı aramid plaka hazırlanarak atış testi yapılmıştır. Yapılan atış testinde Resim 4.3’de görüldüğü üzere ilk atışta 435 m/sn hız ile delinme meydana geldiğinden ikinci atış daha düşük bir hızda 400 m/sn ile yapılmıştır. Yapılan ikinci atışta uygun sonuç elde edildiğinden el yatırması ile üretilen plakada bölgesel farklılıklar olabileceği değerlendirilerek üçüncü atış tekrardan NIJ 0101.04 Seviye III-A’ya karşılık gelen 433 m/sn ile atılmış olup delinme meydana gelmiştir. Balistik performans olarak Seviye III-A koruma seviyesine sahip plakalarda başarı arandığından 13 katlı saf epoksili numune uygun değil olarak sonuçlanmıştır.



Resim 4.3: 13 Katlı Saf Epoksi Reçineli Plakanın Atış Sonrası Ön ve Arka Yüzeyi

Takviyesiz numunelerde balistik sınırın belirlenmesi için yapılan atış testlerinde 15 katlı aramid plakada uygun sonuç, 13 katlı plakada ise uygun olmayan sonuç elde edildiğinden 14 katlı plakaya yapılacak atış sonucunda katkısız epoksi matrisli aramid plakaların balistik sınırının belirlenebileceği değerlendirilmiştir. Bu maksatla saf epoksi reçine ile el yatırması ve sıcak presleme kullanılarak üretilen 14 katlı aramid takviyeli kompozit plakaya uygulanan atış testinde 3 atışta da Resim 4.4’de görüldüğü üzere herhangi bir delinme olmamış olup, sadece 1’inci atış bölgesinde arka yüzeyde penetrasyonun etkisi ile kumaş liflerinde kopmalar meydana gelmiştir. Diğer taraftan arka yüzey penetrasyonu sonucu oluşan çöküntü değerleri de sınırın altında kalarak uygun sonuç elde edilmiştir.



Resim 4.4: 14 Katlı Saf Epoksi Reçineli Plakanın Atış Sonrası Ön ve Arka Yüzeyi

Matris malzemesi olan epoksi reçine içerisinde herhangi bir katkı bulunmayan numunelerde balistik sınırın belirlenmesinin ardından, TiC nanopartikülünün balistik performansa etkisi incelenmiştir. Saf epoksilerde balistik sınır olan 14 katlı aramid plakanın TiC katkısı ile performansının incelenmesi için epoksi içerisine ağırlıkça %3 TiC nanopartikülü takviye edilerek hazırlanmış 14 katlı numuneye balistik test uygulanmıştır. Uygulanan balistik testte NIJ 0101.04 Seviye III-A’ya karşılık gelen 9 mm FMJ mühimmatı ile $436 \pm 9,1$ m/sn aralığında yapılan atışlarda Resim 4.5’de görüldüğü gibi plaka arka yüzeyinde herhangi bir delinme meydana gelmediği ve çöküntü değerlerinin standartta belirlenen 44 mm’nin altında olduğu gözlemlenmiştir.

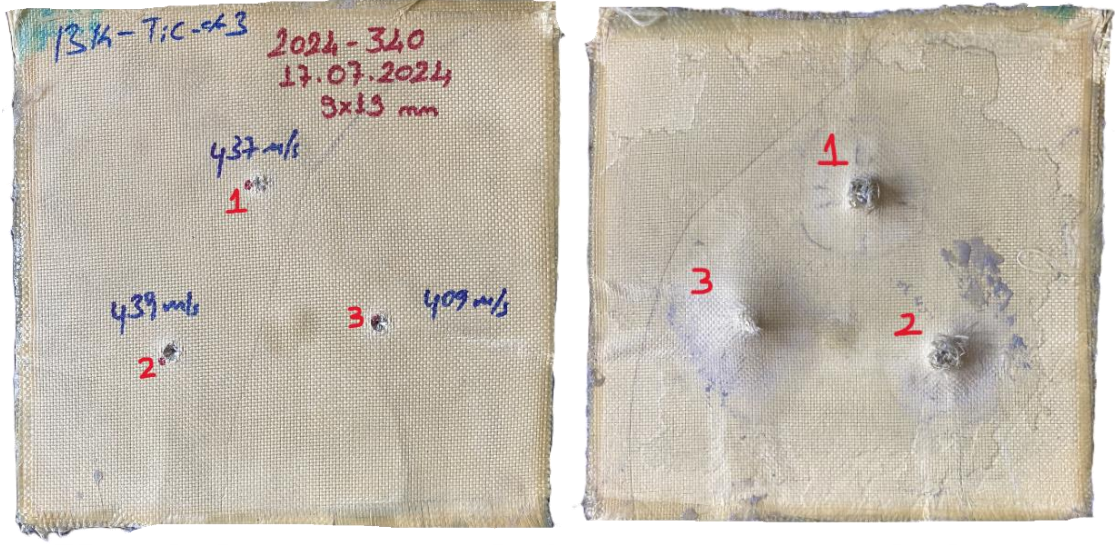


Resim 4.5: 14 Katlı %3 TiC Katkılı Epoksi Reçineli Plakanın Atış Sonrası Ön ve Arka Yüzeyi

Saf epoksi matrisli aramid plakalarda balistik sınır olarak belirlenen 14 katta TiC katkısının balistik performansa etkisinin gözlemlenmesi için ağırlıkça %3 TiC katkılı 14 katlı aramid plakaya yapılan balistik testte uygun sonuç elde edildiğinden, TiC katkısının aramid plakada ekstra kat azaltımına imkan sağlayıp sağlamadığının tayin edilebilmesi için 13 katlı ağırlıkça %3 TiC takviyeli aramid plakaya atış testi yapılmıştır.

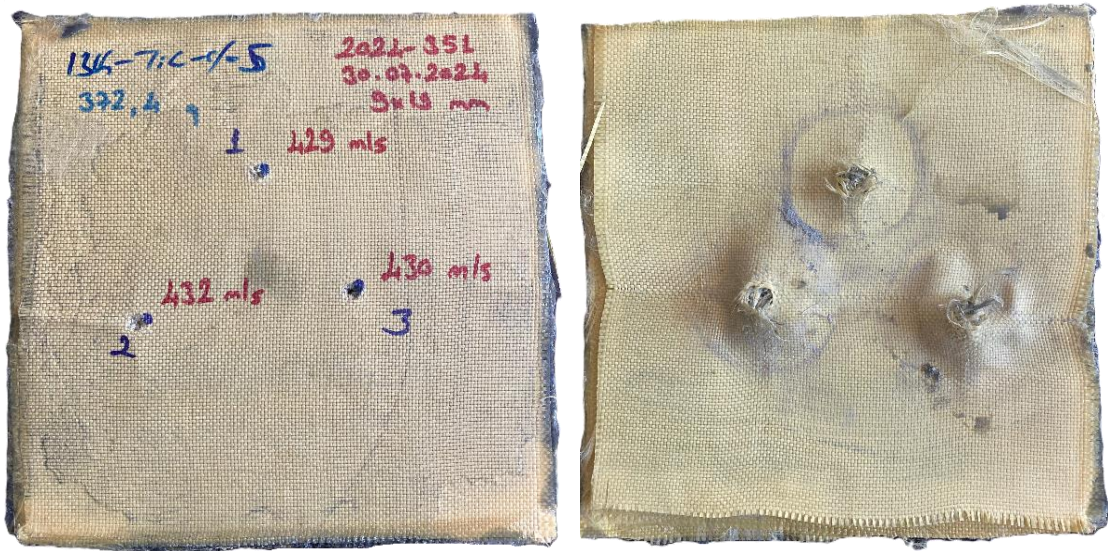
Yapılan testte 437 m/sn ve 439 m/sn hızlar ile atılan birinci ve ikinci atışta delinme meydana gelmiş olup, daha düşük hızlardaki performansın ölçülebilmesi adına 409 m/sn hız ile yapılan üçüncü ve son atışta delinme meydana gelmemiş ve çöküntü değeri 26,20 mm ile 44 mm'nin altında kalmıştır.

Ancak epoksi matris içerisine TiC nanopartikülü takviyesinin aramid plakaların balistik performansına etkisinin araştırılmasında saf ve takviyeli plakalara uygulanan balistik testlerde ölçüt NIJ 0101.04 Seviye III-A'ya karşılık gelen 9 mm FMJ mühimmatı ile $436 \pm 9,1$ m/sn aralığında yapılan atışlarda başarılı sonuç elde etmek olduğundan 13 katmanlı %3 TiC takviyeli aramid plakalarda uygun sonuç elde edilememiştir.



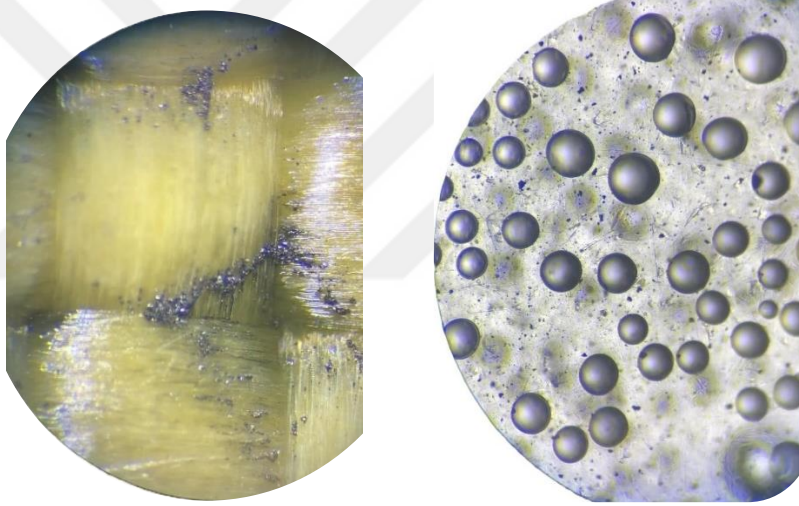
Resim 4.6: 13 Katlı %3 TiC Katkılı Epoksi Reçineli Plakanın Atış Sonrası Ön ve Arka Yüzeyi

TiC katkısının aramid plakalarda balistik performansa etkisinin belirlenmesi ve ekstra kat azaltımına imkan sağlayıp sağlamadığının tespit edilebilmesi maksadıyla TiC takviyesi olarak ağırlıkça %5 TiC kullanılarak hazırlanan 13 katlı aramid plakaya NIJ 0101.04 Seviye III-A standardında 3 atış yapılmıştır. Resim 4.7’de görüldüğü üzere yapılan tüm atışlarda plaka arka yüzeyinde delinme meydana geldiğinden atış testi uygun değil olarak sonuçlanmıştır.



Resim 4.7: 13 Katlı %5 TiC Katkılı Epoksi Reçineli Plakanın Atış Sonrası Ön ve Arka Yüzeyi

Diğer taraftan epoksi matris içerisine takviye edilen TiC nanopartikülünün reçine içerisindeki ve aramid kumaş katmanları üzerindeki dağılımlarının incelenmesi maksadıyla balistik test için hazırlanan plakalardan kürlenmiş reçine ve kumaş kesiti alınarak mikroskop altında 200X yakınlaştırma ile incelenmiştir. Reçine içerisine belirlenen karışım oranlarında takviye edilen TiC nanopartikülünde daha iyi bir dağılım elde edilmesi maksadıyla ultrasonik karıştırma makinası yardımıyla karıştırılarak elde edilen reçine karışımı incelendiğinde nanopartiküllerin çoğunlukla düzgün dağıldığı, kısmi olarak topaklanmaların da bulunduğu gözlemlenmiştir. Ancak aramid kumaş katmanları üzerindeki nanopartiküllerin dağılımı incelendiğinde topaklanma ve bloklaşmaların daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.



Resim 4.8: Aramid Plaka ve Reçine İçerisinde TiC Partiküllerinin Dağılımının Mikroskop Yardımıyla 200X Yakınlıkta Görüntülenmesi

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Aramid takviyeli epoksi matris kompozitlerde ağırlıkça %1, %3 ve %5 oranlarında yapılan TiC nanopartikül takviyesinin mekanik özellikler ve balistik performansa olan etkilerinin incelenmesi maksadıyla yapılan çekme testi, 3 nokta eğme testi ve balistik testlerin sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki maddelerde sıralanmıştır.

- Yapılan çekme testi sonucunda TiC nanopartikülü takviyesinin olduğu tüm numunelerde saf numunelere oranla çekme mukavemeti ve elastisite modülünde artış meydana gelmiştir.
- Çekme mukavemetine ilişkin ortalama çekme mukavemeti değerinde en fazla artış ağırlıkça %1 ve %3 TiC takviyeli numunelerde elde edilmiştir.
- Elastisite modülünde ise en yüksek elastisite modülü değerinin saf numunelere kıyasla %17 oranında bir artışın olduğu ağırlıkça %3 TiC takviyeli numunelerde elde edildiği gözlemlenmiştir.
- Diğer bir mekanik test olan 3 nokta eğilme testi sonucunda da TiC takviyesinin olduğu tüm numunelerde eğilme mukavemeti değerlerinde saf numunelere oranla bir artış gözlemlenmiştir.
- Eğilme mukavemeti değerinde en fazla artış yaklaşık %84'lük bir artış ile ağırlıkça %5 TiC katkılı numunelerde elde edilmiştir.
- Diğer taraftan 3 nokta eğilme testi sonucunda elde edilen eğilme elastisite modülü değerlerinde de aynı şekilde en fazla artış %233 oranında ağırlıkça %5 TiC katkılı numunelerde elde edilirken, en az artış ise %58 oranında ağırlıkça %1 TiC katkılı numunelerde elde edilmiştir.
- Çekme testi ve 3 nokta eğme testi sonuçları ortak olarak değerlendirildiğinde TiC nanopartikülünün epoksi matrisli aramid esaslı zırh kumaşların mekanik özelliklerindeki iyileşmelerde en iyi sonuçların ağırlıkça %3 ve %5 TiC karıştırma oranına sahip numunelerde elde edildiği değerlendirilmiştir.
- Literatürde yer alan diğer çalışmalar incelendiğinde Usal vd. (2020) tarafından TiC nanopartikülü ilavesinin polimer matrisli aramid fiber- cam elyaf takviyeli hibrit kompozitin mekanik özelliklere etkisinin araştırıldığı çalışmada takviye oranı olarak seçilen ağırlıkça %1, %3 ve %5 oranlarından ağırlıkça %3 TiC

takviyesinde en iyi sonuçlar elde edilmiş, Ali (2016) tarafından TiC içeriğinin kompozitlerin mekanik ve tribolojik davranışları üzerindeki etkisinin araştırıldığı çalışmada ise %0, %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında takviye edilen TiC nanopartikülünden en iyi sonuçlar ağırlıkça %15 TiC takviyesinde elde edilmiş ve %20 ile %25 TiC içeren numunelerde TiC partiküllerinin aglomerasyonu ve gözenekliliği nedeniyle, sertlik ve çekme dayanımı değerleri azalmalar olduğunu değerlendirmiştir.

- Bahsedilen çalışmalarda elde edilen sonuçlar göz önüne alındığından bu tez çalışmasında TiC nanopartikülünün aramid elyaf takviyeli kompozit plakaların mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için yapılan deneylerde elde edilen sonuçların tutarlı olduğunu göstermektedir.
- Diğer taraftan TiC nanopartikülünün katkısının balistik performansa olan etkisinin incelenmesi maksadıyla yapılan balistik testlerde 15 kat aramid plaka üzerinden yapılan testte saf epoksili numunede uygun sonuç elde edilirken epoksisiz düz aramid plakada çöküntü değerleri limitinin üzerinde olduğundan başarısız sonuç elde edilmiştir. Böylece epoksi matrisinin balistik performansa olumlu etkisi olduğu tespit edilmiştir.
- Saf epoksili numunelerde yapılan ardışık kat azaltımı testlerinde 13 katlı saf epoksili plakalarda delinme olduğu, 14 katlı saf epoksi plakalarda delinme meydana gelmediğinden; saf epoksili aramid plakalarda balistik sınırın 14 katta olduğu tespit edilmiştir.
- Saf epoksili numunelerde balistik sınır olan 14 kat üzerinden ağırlıkça %3 TiC takviyeli numuneye yapılan balistik testte de uygun sonuç elde edilerek TiC nanopartikülünün balistik performansa herhangi bir olumsuz etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir.
- Balistik sınır olan 14 katın altında kalan çözümlerde nanopartikül takviyesinin balistik performansa etkisinin gözlemlenmesi amacıyla 13 katlı ağırlıkça %3 ve %5 TiC takviyeli plakalara yapılan balistik testlerde NIJ 0101.04 Seviye III-A'a ya göre olumlu sonuç elde edilememiştir.
- Saf epoksili numunelerde ve TiC katkılı numunelerde balistik sınır olan 14 kat ve altındaki çözümlerde benzer sonuçlar elde edildiğinden TiC nanopartikülünün balistik performansa olumlu veya olumsuz bir katkısı olmadığı tespit edilmiştir.

- Mekanik özelliklerde iyileştirmelerin olmasına rağmen balistik performansta olumlu veya olumsuz herhangi bir etki olmamasının sıcak pres altında yüksek basınç ile presleme uygulamasından kaynaklı olarak el yatırması ile sürülen epoksi karışımının plaka kenarlarından belirli oranda taşmasından kaynaklı olarak kumaş katmanlarında yeterli seviyede ıslatmanın sağlanamaması ve tabakalar arası kayma dayanımında azalma meydana gelmesi ihtimaline bağlı olabileceği değerlendirilmiştir. Bu maksatla sonraki çalışmalarda daha düşük miktardaki basınç yardımıyla plakaların basılması ile yapı içerisinde daha fazla epoksi kalmasına bağlı olarak katmanların daha fazla ıslanması ve tabakalar arası kayma dayanımının daha yüksek olması sağlanarak farklı sonuçlar elde edilmesi hususunun araştırılabileceği değerlendirilmektedir.
- Diğer taraftan epoksi matris içerisine takviye edilen TiC nanopartikülünün reçine ve aramid kumaş katmanları üzerindeki dağılımlarının incelenmesi maksadıyla yapılan mikroskobik görüntülemelerde ultrasonik karıştırma makinası yardımıyla hazırlanan reçine karışımı incelendiğinde nanopartiküllerin çoğunlukla düzgün dağıldığı ancak kısmi olarak topaklanmaların da bulunduğu gözlemlenmiştir.
- Aramid kumaş katmanları üzerindeki nanopartiküllerin dağılımı incelendiğinde ise topaklanma ve bloklaşmaların daha fazla olduğu gözlemlenmiş olup, bu hususun hazırlanan reçine karışımının standart ürün üretimi ve reçinenin eşit dağılması noktasında zafiyetlerin olduğu üretim tekniği olan el yatırması yöntemi ile aramid kumaş katmanları üzerine uygulanmasından kaynaklı olduğu değerlendirilmiştir.
- Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde Eskizybek (2012), Ünal (2016), Öner vd. (2016) ve daha birçok çalışmada olumsuz sonuçların nanopartiküllerin reçine içerisinde homojen dağılmaması sonucunda oluşan topaklanmalardan kaynaklandığı değerlendirilmiş ve nanopartiküllerin üstün özelliklerinden kompozit malzemelerde etkili bir şekilde faydalanabilmek için nanopartiküllerin reçine içerisinde homojen bir şekilde dağılması ve topaklanmaların önlenmesinin önem arz ettiği belirlenmiştir.
- Aramid plakaların mekanik özelliklerinde anlamlı bir şekilde iyileştirme sağlayan TiC nanopartikülünün balistik performans etkilerinin incelenmesi maksadıyla reçine karışımının aramid plaka üzerine daha standart ve homojen bir halde

dağılmasını sağlayan vakum infüzyon tekniğı kullanılarak aynı karıştırma oranlarına sahip numunelere yapılacak balistik testlerde farklı sonuçlar elde edilebileceğı değerlendirilmiştir.



6. KAYNAKLAR

- Adams J, 2011, Thomson Reuters Global Research Report, United Kingdom, Leeds Evidence.
- Afshari M, Kotek R, Chen P, 2011, High-Performance Fibers. High Performance Polymers and Engineering Plastics, 269-340.
- Akbulut H, 1994. Alümina Fiber Takviyeli Al-Si Metal Matrisli Kompozitlerin Üretimi ve Mikroyapı- Özellik ilişkilerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 177s, İstanbul.
- Akbulut H, 2007, Kompozit Malzemeler Ders Notları, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya.
- Alagarasi A, 2010, Introduction to Nanomaterials. National Centre for Catalysis Research, India.
- Ali M, 2016, Synthesis and Characterization of Epoxy Matrix Composites Reinforced with Various Ratios of TiC, Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering, 10, 231-237.
- Altınkök N, 2002, Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Al₂O₃/SiC Partikül Destekli Metal Matris Kompozit Üretimi ve Mekanik Davranışlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 159s, Sakarya.
- Atmaca A, 2006, Çelik Fiber Takviyeli Alüminyum Metal Matrisli Kompozit Plakaların Elasto-Plastik Gerilme Analizi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 121s, Ankara.
- Avila A F, Soares M I, Neto A S, 2007, A study on nanostructured laminated plates behavior under low-velocity impact loadings, International Journal of Impact Engineering, 34, 28–41.te
- Bhushan B, 2017 , Encyclopedia of Nanotechnology, Springer Dordrecht, 4427p, Dordrecht.
- Böger L, Sumfleth J, Hedemann H, Schulte K, 2010, Improvement of Fatigue Life by Incorporation of Nanoparticles in Glass Fibre Reinforced Epoxy, Composites, 41, 1419-1424.
- Buytoz S, 1999, Alüminyum Matrisli Al₂O₃ Takviyeli Kompozit Malzemelerin Katı Hal Birleştirme Teknikleri ile Kaynak Edilebilirliğinin Araştırılması, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 99s, Elazığ.

- Cavallaro P V, 2011, Soft Body Armor: An Overview of Materials, Manufacturing, Testing, and Ballistic Impact Dynamics, NUWC-NPT Rapor No:12,057,30.
- Çalın R, 2006, Magnezya Parçacık Takviyeli Al Matrisli Kompozitin Vakum İnfiltrasyon Yöntemi ile Üretilmesi ve Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 139s, Ankara.
- Çelikel A, 2008, Av Tüfeği Namlu Uzunluğunun Saçma Dağılımına Etkisi ve Atış Mesafesinin Belirlenmesinde Önemi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Tıp Fakültesi Adli Tıp Anabilim Dalı, Tıpta Uzmanlık Tezi, 91s, Eskişehir.
- Doğan H Y, Altın Y, Bedeloğlu A Ç, 2021, Grafen takviyeli epoksi nanokompozitlerin özelliklerinin incelenmesi, Politeknik Dergisi, 24, 1719-1727.
- Eskizeybek V, 2012, Yüzeylerine Kimyasal Olarak Karbon Nanotüpler Bağlanmış Örgü Cam Fiber/Epoksi Nanokompozitlerin Üretimi ve Tabakalar Arası Kırılma Davranışlarının İncelenmesi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 139s, Konya.
- Fan Z, Santare M H, Advani S G, 2007, Interlaminar Shear Strength Of Glass Fiber Reinforced Epoxy Composites Enhanced with Multi-Walled Carbon Nanotubes”, *Composites: Part A*, 39, 540-554.
- Farokhzad O C, Langer R, 2009, Impact of Nanotechnology on Drug Delivery *ACS Nano*, 3(1), 16-20.
- Ferreira J A M, Reis P N B, Costa J, Richardson M O W, 2012, the Fatigue behavior of Kevlar composites with nano clay-filled epoxy resin, *Journal of Composite Materials*, 47, 1885–1895.
- Gültekin D, 2007, Metal Matrisli Kompozit Fren Diski, Balatası Üretimi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 231s, Sakarya.
- Heard B J, 2008, Handbook of Firearms and Ballistics: Examining and Interpreting Forensic Evidence: Second Edition, Wiley, 416p,
- Hosseini S A, Pol M H, 2014, Investigation of the tensile and the flexural properties of the glass/epoxy composites reinforced with nano clay particles, *Modares Mechanical Engineering*, 45, 24-32.
- Kamar N T, Hossain M M, 2014, Interlaminar reinforcement of glass fiber/epoxy composites with graphene nanoplatelets, *ScienceDirect Composites Part A*, 32,

36-40.

- Karahan G, 2008. Balistik Yapılarda Balistik Performansı Etkileyen Parametrelerin İncelenmesi, *Tekstil Teknolojileri Dergisi*, 3, 51-58.
- Karippal J J, Narasimha Murthy H N, Rai KS, Sreejith M, Krishna M, 2011, Study of mechanical properties of epoxy/glass/nano clay hybrid. *Composites, Journal of Composite Materials*, 45, 1893-1899.
- Khakzad F, 2017, Grafen Katkılı Cam/Epoksi Nanokompozit Plakaların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 131s, Ankara.
- Khan S U, Munir A, Hussain, R, Kim J-K, 2010, Fatigue damage behaviors of carbon fiber-reinforced epoxy composites, *Composites Science and Technology*, 70, 2077–2085.
- Kircher M F, de la Zerda, A, Jokerst J V, Gambhir S S, 2012, A Brain Tumor Molecular Imaging Strategy Using A New Triple-Modality MRI-Photoacoustic-Raman Nanoparticle, *Nature Medicine*, 18(5), 829-834.
- Kurnaz S C, 1993, δ -Alümina (Saffil) Takviyeli ZA 12 Esaslı Kompozit Malzemelerin İnfiltrasyon Yöntemi ile Üretim ve Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 116s, Sakarya.
- Mhadhbi M, Driss M, 2021, Titanium Carbide: Synthesis, Properties and Applications, *Journal of Brilliant Engineering*, 2, 1-11.
- Ögel B, 1997, Kompozit Malzemelerde Son Gelişmeler ve İleriye Dönük Beklentiler, 9’uncu Uluslararası Metalürji ve Malzeme Kongresi, TMMOB İstanbul, 639-650.
- Öner G, Ünal H Y, Pekbey Y, 2016, Experimental Investigation of Low-Velocity Impact Response of Plain-Weave Glass/Epoxy Composites Reinforced with Carbon Nanotubes, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31, 87-97.
- Öner G, Ünal H Y, Pekbey Y, 2017, Karbon nanotüp katkılı camlı-epoksi kompozitlerin termal ve eğilme özelliklerinin araştırılması, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 8, 805-816.
- Özer G, 2008, Dış Balistik Analizinde İzdüşüm Alanı Etkilerinin Araştırılması, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 119s, Kırıkkale.
- Pekbey Y, Aslantaş K, Yumak N, 2017, Ballistic impact response of Kevlar Composites

- with filled epoxy matrix, *Steel and Composite Structures*, 24, 191-200.
- Powell D A, Zohdi T I, 2009, Attachment Mode Performance of Network-Modeled Ballistic Fabric Shielding, *Composites Part B: Engineering*, 40, 451-460.
- Prashanth S, Subbaya K M, Nithin K, Sachhidananda S, 2017, Fiber Reinforced Composites-A Review, *Journal of Material Sciences & Engineering*, 6, Article number 1000341.
- Raghul K S, Nandakumar D, Jeyakumar R, 2016, Mechanical behavior of glass fiber/epoxy modified with nanocomposites: a review, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 5, 6-12.
- Reis P N B, Ferreira J A M, Zhang Z, Benameur T, Richardson M O W, 2013, Impact response of Kevlar composites with nano clay enhanced epoxy matrix, *Composites: Part B*, 46, 7-14.
- Sheikh-Ahmad J Y, 2009, *Machining of Polymer Composites*, Springer New York, 321p, NY USA.
- Soy U, 2009, SiC/B₄C Takviyeli Metal Matris Kompozit Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 296s, Sakarya.
- Sözen E, Gündüz G, İmren E, 2016, Balistik Panel ve Koruyucu Zırh Üretiminde Kullanılan Lif ve Kompozit Malzemeler, *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 18 (2), 194-204.
- Şahin İ, Akdoğan A, 2006 Sic Partikül Takviyeli AlSi7Mg2 Matrisli Kompozit Malzemelerin Talaşlı Şekillendirilmesinde Takım Aşınması ve Talaş Oluşumunun İncelenmesi, *Proceedings of 11th International Materials Symposium*, April 19-21, 169-173, Denizli.
- Şen Ö, 2022, Grafen ve Aramid Takviyeli Epoksi Matrisli Hibrit Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 77 Sayfa, Karabük.
- Toptan F, Kumdalı F, Kerti I, 2007, Al-B₄C Kompozitlerinin Fren Diski Olarak Kullanılabilirliğine Genel Bir Bakış, *Metalurji Dergisi*, 145, 2007.
- Usal M R, Taşlıdere M, Saraç M F, 2020, Titanyum Karbür (TiC) Takviyeli Epoksi ile Güçlendirilmiş Hibrit Kompozitlerin Çarpma Davranışının Deneysel ve Sayısal İncelenmesi, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8, 18-32.

- Ünal H Y, 2016, Nano Takviyeli Kompozit Malzemelerde Yorulma Karakteristiğinin Araştırılması, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 121s, İzmir.
- Ünal O, 2005, Kompozit Malzemeler, Yapı Malzemesi Ders Notları, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Yapı Eğitimi Bölümü, Afyon.
- Üstün H S, 2020, Enhancement of Ballistic Properties By Hybridization Method of Multilayered Composite Panels, Graduate School of Engineering and Sciences of İzmir Institute of Technology, M. Sc. Thesis, 100p, İzmir.
- Üzümcü N, 2017, Nano Karbon Partikül İle Güçlendirilmiş Kompozit Levha Üretimi ve Darbe Davranışlarının İncelenmesi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 71s, Denizli.
- Visakh P M, Martínez-Morlanes M J, 2016, Nanomaterials and Nanocomposites: Zero-to Three-Dimensional Materials and Their Composit, Springer, Netherlands.
- Yumak N, Pekbey Y ve Aslantaş K, 2014, Zırh Tasarımında Kullanılan Kompozit Malzemelerin Deformasyon Karakteristiğinin Araştırılması, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 10, 1-21.
- Zhang X, Li X, 2021, Production of TiC Nanoparticles via Carbothermal Reduction Method, Materials Letters.
- Wall J W, 2002, An Investigation of The Ballistic Impact Resistance of Modified 2x1, Four-Step, Three-Dimensionally Braided Composites with Axial Reinforcement.
- Whitesides G M, 2003, The 'right' size in nanobiotechnology, Nature Biotechnology, 21(10), 1161-1165.