

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
NANOBİLİM VE NANOTEKNOLOJİ ANABİLİM DALI**

**NANOBALİSTİK MALZEMELER: B₄C/GNP_s PARA-
ARAMİD/EPOKSİ PLAKALAR VE NANO
KATKILI/CVD/PECVD SOFT ARAMİD YAPILAR**

**Hazırlayan
Nedim Erman BİLİŞİK**

**Danışman
Doç. Dr. Gülhan GÜLER**

Doktora Tezi

**Temmuz 2025
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
NANOBİLİM VE NANOTEKNOLOJİ ANABİLİM DALI**

**NANOBALİSTİK MALZEMELER: B₄C/GNP_s PARA-
ARAMİD/EPOKSİ PLAKALAR VE NANO
KATKILI/CVD/PECVD SOFT ARAMİD YAPILAR
(Doktora Tezi)**

**Hazırlayan
Nedim Erman BİLİŞİK**

**Danışman
Doç. Dr. Gülhan GÜLER**

**Bu çalışma, Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi
tarafından FDK-2023-13113 kodlu proje ile desteklenmiştir.**

**Temmuz 2025
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Nedim Erman BİLİŞİK

İmza



“Nanobalistik Malzemeler: B₄C/GNPs Para-Aramid/Epoksi Plakalar ve Nano Katkılı/CVD/PECVD Soft Aramid Yapılar” adlı Doktora tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan

Nedim Erman BİLİŞİK

İmza

Danışman

Doç. Dr. Gülhan GÜLER

İmza

Nanobilim ve Nanoteknoloji ABD Başkanı

Prof. Dr. Mustafa Serdar ÖNSES

İmza

TEŞEKKÜR

Doktora tezim sürecinde beni bilgi ve deneyimiyle yönlendiren, tezin başarılı bir şekilde tamamlanmasında yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Gülhan GÜLER'e ve eş danışmanım Prof. Dr. Abdulkadir BİLİŞİK'e teşekkür ederim.

Tez Jürimde bulunan Prof. Dr Mustafa Serdar ÖNSES ve Prof. Dr. Recep GÜNEŞ'e sırası ile ERNAM deki CVD, PECVD ve Makine Mühendisliği Balistik Laboratuvarındaki çalışmalarımda, bilgi birikimlerini ile gösterdikleri yardımlarından dolayı teşekkür ederim. Mali açıdan sağlanan destekten ötürü Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine teşekkür ederim.

Doktora çalışmalarım boyunca bana yardımcı olan Erciyes Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezine (ERNAM) özellikle Dr. Öğretim Üyesi Sami PEKDEMİR ve İsmail KILIÇ' a; Erciyes Üniversitesi Teknoloji ve Araştırma Uygulama Merkezine (TAUM) özellikle Dr. Mehmet ÇADIR, Öğretim Görevlileri İhsan AKŞİT, Kamil GÜRMEN, Semiha KÖPRÜ ve Altunay BOYRAZ'a teşekkür ederim.

Düşürme testi sürecinde yardımcı olan Arş. Gör. Dr. Mevlüt HAKAN'a teşekkür ederim. Kompozit plakaların üretiminde ve sonuçların analizinde benden yardımlarını esirgemeyen hocam Öğretim Görevlisi Dr. Mahmut KORKMAZ'a teşekkür ederim.

Balistik testlerin yapılmasında bana yardımcı olan Doç. Dr. Murat AYDIN ve Öğretim Görevlisi Alper Tunga CEYLAN'a teşekkür ederim. Katarası basma testlerinde yardımcı olan Prof. Dr. Cengiz Duran ATİŞ ve Arş. Gör. Dr. Ezgi ÖRKLEMEZ'e en içten samimi teşekkürlerimi sunarım. Balistik plakalar üretim sürecinde yardımcı olan Ahmet Bilal ÜNALAN ve Burak ERTAŞ'a teşekkür ederim.

Tez çalışması boyunca bana verdiği manevi destek, göstermiş olduğu sabır ve anlayıştan dolayı annem Türkay BİLİŞİK, babam Abdulkadir BİLİŞİK ve ablam Havva Esra BİLİŞİK'e teşekkür ederim.

Nedim Erman BİLİŞİK

Temmuz 2025, KAYSERİ

NANOBALİSTİK MALZEMELER: B₄C/GNPs PARA-ARAMİD/EPOKSİ PLAKALAR VE NANO KATKILI/CVD/PECVD SOFT ARAMİD YAPILAR

Nedim Erman BİLİŞİK

**Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Doktora Tezi, Temmuz 2025
Danışman: Doç. Dr. Gülhan GÜLER**

ÖZET

Bu tez kapsamında nano bor karbür (nh-B₄C), karbon nanotüp (MWCNTs) ve grafen nano plaka (GNPs) eklemeli para-aramid kumaş yapılarla birlikte kimyasal buharlama ile yüzeyde karbon nanobüyütmeli (CVD) ve plazma işlemleri (PECVD) kumaşlar soft balistik uygulamalar için geliştirilmiştir. Ek olarak, nano bor karbür para-aramid/epoksi balistik plakalar ve nano kompozit yapılar üretilerek balistik ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Bu araştırmalar sonucunda soft balistik için “ardıl sıkıştırma yöntemi” bulunmuştur. Nano hegzagonal bor karbür eklemeli para-aramid soft yapının tekli ve çolu pull-out dayanımları nano bor karbürün para-aramid filament arayüzündeki sürtünmeleri artırması nedeni ile diğer yapılara kıyasla süper performans göstermiştir. Nano hegzagonal bor karbür eklemeli para-aramid/epoksi plakanın çoklu atışlar sonucu balistik performansı ile nano bor karbür para-aramid/epoksi kompozitin ağırlık düşürme ve ağırlık düşürme sonrası basma (CALVI) performansları bozunma modları üzerinden değerlendirildiğinde hasar toleransı iyileştirilmiş bir malzeme gibi davranmıştır. Nano bor karbür para-aramid/epoksi kompozitin çekme özellikleri diğer yapılara göre bir miktar düşük çıksada basma, eğilme ve katarası kayma performansları daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca, bozunma modları incelendiğinde nano bor karbür p-aramid/epoksi kompozitde katarası açılma yerinde hapsedilerek tamamı ile bozunmanın önüne, katarası nano bor karbür etkisi ile geçerek malzemeye hasar toleransı iyileştirme özelliği katmıştır.

Anahtar kelimeler: Nano h-bor karbür(B₄C), para-aramid kumaş, nanobalistik, nanopull-out, CVD, PECVD.

NANOBALLISTIC MATERIALS: B₄C/GNPs PARA-ARAMID/EPOXY PLATES AND NANO-ENHANCED/CVD/PECVD SOFT ARAMID STRUCTURES

Nedim Erman BİLİŞİK

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

PhD Thesis, July 2025

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Gülhan GÜLER

ABSTRACT

In the scope of this dissertation, para-aramid fabric enhanced with nano-sized boron carbide (nh-B₄C), carbon nanotubes (MWCNTs), and graphene nanoplatelets (GNPs), in addition to surface-modified fabrics via chemical vapor deposition (CVD) and plasma-enhanced chemical vapor deposition (PECVD), have been developed for application in soft ballistic protection systems. Furthermore, ballistic plates composed of para-aramid/epoxy matrix reinforced with nano boron carbide and the resulting nanocomposite structures were fabricated and characterized to investigate their ballistic and mechanical performance. As a novel contribution to the field, the "*sequential compression method*" has been introduced as a fabrication technique suitable for soft ballistic applications. Para-aramid soft structures incorporated with nano hexagonal boron carbide exhibited superior performance in both single and multiple yarn pull-out tests due to enhanced interfacial friction between the para-aramid filaments and the nano reinforcement. The multi-hit ballistic performance of the nano boron carbide-reinforced para-aramid/epoxy plates, along with the drop weight and compression after impact (CALVI) performance of the nh-B₄C and GNPs composites, have been evaluated through failure mode analysis. The results demonstrate that the nano plate and composites behaves as a damage-tolerant materials. Although the tensile strength of the nano boron carbide para-aramid/epoxy composite was slightly lower compared to other configurations, its compressive strength, flexural performance, and interlaminar shear strength were found to be significantly enhanced. Moreover, examination of failure mechanisms revealed that the nano boron carbide at the interlaminar interfaces effectively prevented crack propagation by entrapment and bridging, thereby contributing to the damage tolerance of the material system.

Keywords: Nano hexagonal boron carbide (B₄C), para-aramid fabric, nanoballistics, nanopull-out, CVD, PECVD.

İÇİNDEKİLER

NANOBALİSTİK MALZEMELER: B₄C/GNPs PARA-ARAMİD/EPOKSİ PLAKALAR VE NANO KATKILI/CVD/PECVD SOFT ARAMİD YAPILAR

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK	ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK.....	iii
KABUL VE ONAY	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ÖZET	vi
ABSTRACT.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
KISALTMALAR	xv
TABLolar LİSTESİ.....	xxi
ŞEKİLLER LİSTESİ	xxiii
GİRİŞ	1

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1. BÖLÜM.....	4
GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR.....	4
1.1. Genel bilgiler	4
1.2. Kumaştan iplik çekme (Pull-out).....	5
1.3. Lif ve kumaş sürtünmesi	8
1.4. Nanobalistik (yüksek hız)	9
1.5. Nanodüşürme (düşük hızlı darbe)	13
1.6. Darbe sonrası basma (CALVI)	15
1.7. Mekanik özellikler.....	16
1.7.1. Çekme	16

1.7.2. Basma.....	17
1.7.3. Eğilme	18
1.7.4. Katarası kayma dayanımı.....	20
1.8. Literatür sonuçlarının değerlendirilmesi.....	21
1.8.1. Çalışmanın amacı.....	21
1.8.2. Problemin tanımı	21
1.8.3. Çözüm önerisi.....	22

2. BÖLÜM

YÖNTEM VE MATERYAL

2.1. Hammadde.....	23
2.1.1. Kumaş	23
2.1.2. Reçine ve sertleştirici.....	24
2.1.3. Nano malzeme	24
2.2. Soft nano para-aramid yapılar	26
2.2.1. Nano malzeme kaplamalı p-aramid kumaşlar.....	26
2.2.2. Kimyasal buhar biriktirme (CVD) ve plazma kaplamalı p-aramid kumaşlar	29
2.3. Nano katkılı para-aramid/epoksi kompozit ve balistik yapılar	35
2.3.1. Nanokompozit ve nanobalistik üretim adımları	35
2.3.2. Nanobalistik plaka üretimi	38
2.4. Soft ve katı yapılar üzerine statik ve dinamik testler	40
2.4.1. Pull-out testleri.....	40
2.4.2. Sürtünme testleri	43
2.4.3. Statik mekanik testleri	45
2.4.3.1. Çekme testi.....	46
2.4.3.2. Basma testi	48
2.4.3.3. Eğilme (3-nokta) testi.....	49

2.4.3.4. Kısa kiriş eğme (Short-beam, 3-nokta) testi	50
2.4.3.5. Katarası basma (aksiyal) testi.....	51
2.4.3.6. Katarası basma (kalınlık) testi.....	52
2.4.4. Dinamik balistik, düşük hızlı darbe, darbe sonrası basma testleri.....	53
2.4.4.1. Düşük hızlı darbe testi	54
2.4.4.2. Düşük hızda darbe sonrası basma (CALVI) testi	55
2.4.4.3. Balistik test.....	56
2.4.5. Morfolojik testler	61
2.4.5.1. Alan emisyonlu taramalı elektron mikroskop (FESEM)	61
2.4.5.2 Optik mikroskop (Işık mikroskop).....	62
2.4.6. Analitik karakterizasyon testler	63
2.4.6.1. Fourier dönüşüm kızılötesi spektroskopisi (FTIR).....	63
2.4.6.2. Raman spektroskopisi (RAMAN).....	64
2.4.6.3. Termogravimetrik analiz/Diferansiyel termal analiz (TGA/DTA) .	64
2.4.6.4. X-ışını difraksiyonu (XRD)	65
2.4.7. Diğer testler	65
2.4.7.1. Yoğunluk testi.....	66
2.4.7.2. Kompozit lif hacmi testleri	67
2.4.7.3. Kumaş spesifikasyon testleri.....	70

3. BÖLÜM

BULGULAR

3. BÖLÜM.....	71
BULGULAR.....	71
3.1. Yoğunluk ve lif hacmi verileri.....	71
3.2. Kumaştan iplik çekme (Pull-out) verileri	72
3.2.1. Nano kaplama kumaş yapılar	72

3.2.1.1. Alan emisyonlu taramalı elektron mikroskop (FESEM) verileri	72
3.2.1.2. EDX verileri.....	73
3.2.1.3. Fourier dönüşüm kızılötesi spektroskopisi (FTIR) verileri	74
3.2.1.4. Raman spektroskopisi (RAMAN) verileri	76
3.2.1.5. XRD verileri.....	77
3.2.1.6. TGA/DTA verileri	77
3.2.1.7. Nano kaplı kumaşlarda tekli ve çoklu iplik çekimiyle kuvvet-yer değiştirme.....	78
3.2.1.8. Nano kaplı kumaşlarda tekli ve çoklu pull-out enerjisi.....	79
3.2.2 Kimyasal buharla biriktirme (CVD) ve plazma (PECVD) işlemli p-aramid kumaş yapılar	80
3.2.2.1. Alan emisyonlu taramalı elektron mikroskop (FESEM) verileri	81
3.2.2.2. EDX verileri.....	82
3.2.2.3. Fourier dönüşüm kızılötesi spektroskopisi (FTIR) verileri	82
3.2.2.4. Raman spektroskopisi (RAMAN) verileri	83
3.2.2.5. XRD verileri.....	84
3.2.2.6. TGA/DTA verileri	85
3.2.2.7. CVD ve PECVD kumaşlarda tekli ve çoklu iplik çekimiyle kuvvet- yer değiştirme	85
3.2.2.8. CVD ve PECVD kumaşlarda tekli ve çoklu pull-out enerjisi	87
3.3. Sürtünme verileri	87
3.3.1. Nano kaplama kumaş yapılar	87
3.3.2. Kimyasal buharla biriktirme (CVD) ve plazma (PECVD) işlemli p- aramid kumaş yapılar	88
3.4. Balistik veriler (Yüksek hız).....	89
3.5. Katarası basma verileri (aksiyal).....	93
3.6. Katarası basma verileri (kalınlık)	96
3.7. Ağırlık düşürme verileri (Düşük hız)	97

3.8. Ağırlık düşürme sonrası basma verileri (CALVI)	98
3.9. Çekme verileri	101
3.10. Basma verileri.....	104
3.11. Eğilme verileri	106
3.12. Katarası kayma dayanımı (Short beam) verileri	108

4. BÖLÜM

TARTIŞMA-SONUÇ VE ÖNERİLER

4.1.Tartışma	110
4.1.1. Para-aramid/epoksi nano kompozit yoğunluk sonuçları	110
4.1.2. Para-aramid/epoksi nano kompozit lif hacim sonuçları	111
4.1.3. Nano pull-out sonuçları.....	112
4.1.3.1. Nano kaplama, CVD ve PECVD işlemli soft para-aramid kumaş yapıların analitik karakterizasyon sonuçları	112
4.1.3.1.1. FESEM ve EDX sonuçları.....	112
4.1.3.1.2. FTIR sonuçları	113
4.1.3.1.3. RAMAN sonuçları.....	116
4.1.3.1.4. XRD sonuçları	120
4.1.3.1.5. TGA/DTA sonuçları.....	122
4.1.3.2. Nano kaplama, CVD ve PECVD işlemli soft para-aramid kumaş yapıların pull-out kuvvet(N)-yer değiştirme(mm) sonuçları.....	123
4.1.3.3. Nano kaplama, CVD ve PECVD işlemli soft para-aramid kumaş yapıların pull-out enerji sonuçları.....	129
4.1.4. Nano kaplama, CVD ve PECVD işlemli soft para-aramid kumaşlarda sürtünme sonuçları	135
4.1.4.1. Statik sürtünme sonuçları	135
4.1.4.2. Kinetik sürtünme sonuçları.....	139
4.1.5. Para-aramid/epoksi/nh-B ₄ C balistik plaka atış sonuçları.....	143
4.1.5.1. Mermi giriş-çıkış hızları ve enerji sönümleme	143

4.1.5.2. Para-aramid/epoksi/nh-B ₄ C balistik plaka bozunma modları	146
4.1.6. Para-aramid/epoksi nano kompozit katarası basma (aksiyal) sonuçları	150
4.1.6.1. Katarası basma(aksiyal) dayanımı, uzama ve modül sonuçları	150
4.1.6.2. Katarası basma (aksiyal) bozunma modu	151
4.1.7. Para-aramid/epoksi nano kompozit katarası basma (kalınlık) sonuçları	153
4.1.7.1. Katarası basma(kalınlık) dayanım sonuçları	153
4.1.7.2. Katarası basma (kalınlık) bozunma modu	155
4.1.8. Para-aramid/epoksi nano kompozit ağırlık düşürme (DROP) sonuçları	157
4.1.8.1. Ağırlık düşürme maksimum kuvvet ve bozunma alanı sonuçları.	157
4.1.8.2. Ağırlık düşürme bozunma modu	158
4.1.9. Para-aramid/epoksi nano kompozit ağırlık düşürme sonrası basma (CALVI) sonuçları	160
4.1.9.1. CALVI dayanım, gerilme(MPa)-uzama(%) ve modül sonuçları ..	160
4.1.9.2. CALVI bozunma modu sonuçları	161
4.1.10. Para-aramid/epoksi nano kompozit statik çekme sonuçları.....	164
4.1.10.1. Çekme gerilme(MPa)-uzama(%) ve modül sonuçları	164
4.1.10.2. Çekme bozunma modu sonuçları	164
4.1.11. Para-aramid/epoksi nano kompozit statik basma sonuçları	167
4.1.11.1. Basma gerilme(MPa)-uzama(%) ve modül sonuçları.....	167
4.1.11.2. Basma bozunma modu sonuçları.....	168
4.1.12. Para-aramid/epoksi nano kompozitlerde statik eğilme (3-nokta) sonuçları.....	171
4.1.12.1. Eğilme gerilme(MPa)-uzama(%) ve modül sonuçları	171
4.1.12.2. Eğilme bozunma modu sonuçları	172

4.1.13. Para-aramid/epoksi nano kompozit statik katarası kayma dayanımı (kısa kiriş testi, short beam) sonuçları.....	174
4.1.13.1. Katarası kayma dayanım, gerilme(MPa) ve uzama(mm) sonuçları	174
4.1.13.2. Katarası kayma bozunma modu sonuçları.....	175
4.2. Sonuç ve Öneriler	177
4.2.1. Pull-out sonuçları ve öneriler	177
4.2.2. Sürtünme sonuçları ve öneriler	177
4.2.3. Balistik sonuçları ve öneriler	178
4.2.4. Ağırlık düşürme sonuçları ve öneriler	178
4.2.5. Ağırlık düşürme sonrası basma (CALVI) sonuçları ve öneriler	179
4.2.6. Mekanik sonuçlar ve öneriler	179
4.2.6.1. Çekme.....	179
4.2.6.2. Basma	179
4.2.6.3. Katarası basma (aksiyal)	179
4.2.6.4. Katarası basma (kalınlık).....	180
4.2.6.5. Eğilme.....	180
4.2.6.6. Katarası kayma (short beam)	180
KAYNAKÇA	182
ÖZGEÇMİŞ.....	204

KISALTMALAR

STF:	Kayma kalınlaşmalı akışkan
CNTs:	Karbon nanotüpler
ERNAM:	Erciyes üniversitesi nanoteknoloji uygulama ve araştırma merkezi
ERÜTAUM:	Erciyes üniversitesi teknoloji araştırma ve uygulama merkezi
ANSYS:	Analiz Sistemi
LS-DYNA:	Livermore Yazılımı – Dinamik Doğrusal Olmayan Analiz
AI:	Yapay zeka
ANN:	Yapay sinir ağı
İHA:	İnsansız hava aracı
2D:	İki boyutlu
3D:	Üç boyutlu
P-aramid:	Para-aramid kumaş
LIG:	Lazerle oluşturulmuş grafen
APPT:	Atmosferik basınçlı plazma torcu
N ₂ :	Azot gazı
(CH ₃) ₂ Cl ₂ Si:	Diklorodimetilsilan
UHMWPE:	Ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen
CSF:	İplikler arası statik sürtünme katsayısı
SiC:	Silisyum karbür
PEG:	Polietilen glikol
ZnO:	Çinko oksit
SiO ₂ :	Silisyum dioksit
MTMS:	Metil trimetoksisilan
DIC:	Dijital görüntü korelasyonu
Mode-I:	Çekme esaslı katarası açılma
dTex:	10.000 metredeki lif veya ipliğin gram cinsinden kütlesi
F-35:	Fighter 35 savaş uçağı
Al ₂ O ₃ :	Alüminyum oksit
BN:	Bor nitrür
AL2024:	Bakır katkılı alüminyum alaşımı
Al7075:	Çinko katkılı alüminyum alaşımı
E-cam:	Elektriksel kalite cam elyafi

Z-lif: Kalınlık (Z) yönünde yerleştirilmiş elyaf
 S-lif: Yapısal amaçlı cam elyafı
 NASA: Ulusal havacılık ve uzay dairesi
 SACMA: Gelişmiş kompozit malzemeler derneği
 AIRBUS: Avrupa uçak üretim şirketi
 BAE Systems: Britanya havacılık ve uzay sistemleri
 Z-çubuk: Kalınlık (Z) yönünde yerleştirilmiş çubuk
 NCF: Krimpsiz kumaş esaslı kompozit
 $[-\text{CO}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CO}-\text{NH}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{NH}-]_n$: Aromatik poliamid
 Teijin Inc.: Japon kimya ve teknoloji şirketi
 Twaron CT® 747: Para-aramid kumaş (ticari kodlu)
 tex: 1000 metredeki ipliğin gram cinsinden kütlesi
 nm: Nanometre
 µm: Mikrometre
 Bisfenol A: Aromatik yapıdaki epoksi reçine
 Bisfenol F: Daha düşük viskoziteli epoksi reçine
 CH₃-CH₂OH: Etil alkol
 KPO: Kaplamasız (ham) para-aramid kumaş
 BPO: Nano nanohegzagonal bor karbür kaplamalı para-aramid kumaş
 MPO: Çok duvarlı karbon nanotüpler kaplamalı para-aramid kumaş
 GPO: Grafen nano plakalar kaplamalı para-aramid kumaş
 gCPO: Kimyasal buhar biriktirmeli para-aramid kumaş
 PPO: Plazma uygulanmış para-aramid kumaş
 RPO: Kimyasal uzaklaştırılmış para-aramid kumaş
 mol/L: Mol bölü litre
 rpm: Dakikadaki devir sayısı
 H₂: Hidrojen
 C₂H₂: Asetilen
 Ar: Argon
 N: Newton
 µs: Statik sürtünme katsayısı
 µks: Kinetik sürtünme katsayısı
 NKKT: Kontrol para-aramid/epoksi kompozit çekme testi numunesi

NKBT: nanoBor karbür/epoksi para-aramid nanokompozit çekme testi numunesi

NKGT: Grafen nano plakalar/epoksi para-aramid nanokompozit çekme testi numunesi

NBGT: nanoBor karbür / Grafen nano plakalar /epoksi para-aramid nanokompozit çekme testi numunesi

NKKC: Kontrol para-aramid/epoksi kompozit basma testi numunesi

NKBC: nanoBor karbür/epoksi para-aramid nanokompozit basma testi numunesi

NKGC: Grafen nano plakalar/epoksi para-aramid nanokompozit basma testi numunesi

NBGC: nanoBor karbür / Grafen nano plakalar /epoksi para-aramid nanokompozit basma testi numunesi

NKKF: Kontrol para-aramid/epoksi kompozit eğilme testi numunesi

NKBF: nanoBor karbür/epoksi para-aramid nanokompozit eğilme testi numunesi

NKGF: Grafen nano plakalar/epoksi para-aramid nanokompozit eğilme testi numunesi

NBGF: nanoBor karbür / Grafen nano plakalar /epoksi para-aramid nanokompozit eğilme testi numunesi

NKKS: Kontrol para-aramid/epoksi kompozit kısa kiriş testi numunesi

NKBS: nanoBor karbür/epoksi para-aramid nanokompozit kısa kiriş testi numunesi

NKGS: Grafen nano plakalar/epoksi para-aramid nanokompozit kısa kiriş testi numunesi

NBGS: nanoBor karbür / Grafen nano plakalar /epoksi para-aramid nanokompozit kısa kiriş testi numunesi

NBKWIC: Kontrol para-aramid/epoksi kompozit Katarası basma (aksiyal)-çözgü yönü testi numunesi

NBBWIC: nanoBor karbür/epoksi para-aramid nanokompozit Katarası basma (aksiyal)-çözgü yönü testi numunesi

NBKFIC: Kontrol para-aramid/epoksi kompozit Katarası basma (aksiyal)-atkı yönü testi numunesi

NBBFIC: nanoBor karbür/epoksi para-aramid nanokompozit Katarası basma (aksiyal)-atkı yönü testi numunesi

NBKWCT: Kontrol para-aramid/epoksi kompozit Katarası basma (kalınlık)-çözgü yönü testi numunesi

NBBWCT: nanoBor karbür/epoksi para-aramid nanokompozit Katarası basma (kalınlık)-çözgü yönü testi numunesi

NBKFCT: Kontrol para-aramid/epoksi kompozit Katarası basma (kalınlık)-çözgü yönü testi numunesi

NBBFCT: nanoBor karbür/epoksi para-aramid nanokompozit Katarası basma (kalınlık)-
çözgü yönü testi numunesi

TrapeziumVR: Trapezium yazılım programı

AG-XD (JP): Çekme testi cihazı

ASTM D3039-14: Polimer matrisli kompozit malzemelerin çekme özellikleri için
standart test yöntemi

ASTM D695-08: Polimer matrisli kompozit malzemelerin basma özellikleri için standart
test yöntemi

ASTM D790-10: Polimer matrisli kompozit malzemelerin eğilme özellikleri için standart
test yöntemi

NKKD: Kontrol p-aramid/epoksi para-aramid kompozit düşürme testi numunesi

NKBD: nanobor karbür/epoksi para-aramid nanokompozit testi numunesi

NKGD: Grafen nano plakalar/epoksi para-aramid nanokompozit testi numunesi

NBGD: nanobor karbür/Grafen nano plakalar/epoksi para-aramid nanokompozit testi
numunesi

NKKCL: Kontrol para-aramid/epoksi para-aramid nanokompozit düşürme testi sonrası
basma testi numunesi

NKBCL: nanobor karbür//epoksi para-aramid nanokompozit düşürme testi sonrası basma
testi numunesi

NKGCL: Grafen nano plakalar /epoksi para-aramid nanokompozit düşürme testi sonrası
basma testi numunesi

NBGCL: nanobor karbür/ Grafen nano plakalar /epoksi para-aramid nanokompozit
düşürme testi sonrası basma testi numunesi

NBK8: Kontrol para-aramid/epoksi para-aramid nanobalistik testi numunesi

NBB8: nanoBor karbür/epoksi para-aramid nanobalistik testi numunesi

DAS 16000: Veri toplama sistemi

ASTM D7136/D7136M-07: Kompozit malzemelerde düşen ağırlık darbe testi standardı

ASTM D7137/D7137M-12: Hasar görmüş kompozit plakaların basma sonrası dayanım
testi standardı

AISI 4340H: Nikel-krom-molibden alaşımlı yüksek dayanımlı çelik

RC: Rockwell sertlik değeri

HRC: Rockwell C sertlik ölçeği

NATO STANAG 2920: Balistik koruyucu malzemeler için delici cisimlere karşı koruma standardı

MIL-DTL-46593B(MR): Kalibre .22, .30, .50 ve 20 mm'lik parça simülasyon mermileri için askeri teknik şartname

PFV4: Photron Fastcam Viewer 4 yazılımı

NKKY: Kontrol para-aramid/epoksi kompozit yoğunluk testi numunesi

NKBY: nanobor karbür/epoksi para-aramid kompozit yoğunluk testi numunesi

NKGY: Grafen nano plakalar/epoksi para-aramid kompozit yoğunluk testi numunesi

NBGY: nanobor karbür/Grafen nano plakalar/epoksi para-aramid kompozit yoğunluk testi numunesi

NKKV: Kontrol para-aramid/epoksi kompozit lif hacmi testi numunesi

NKBV: nanobor karbür/epoksi para-aramid kompozit lif hacmi testi numunesi

NKGV: Grafen nano plakalar/epoksi para-aramid kompozit lif hacmi testi numunesi

NBGV: nanobor karbür/Grafen nano plakalar/epoksi para-aramid kompozit lif hacmi testi numunesi

ASTM D792-91: Plastik malzemelerin yoğunluk ve özgül ağırlık ölçüm standardı

ASTM D792-08: Plastik malzemelerin yoğunluk ve özgül ağırlık ölçüm standardı

ASTM D3171-99: Kompozit malzemelerde reçine, takviye ve boşluk oranlarının belirlenmesi standardı

ASTM D2734-91: Takviyeli plastiklerde boşluk oranının hesaplanması standardı

ISO 7211-3:1984: Kumaşta iplik büküm oranı belirleme standardı

ISO 1765: Makine üretimi tekstil zemin kaplamalarının kalınlık ölçüm standardı

cm⁻¹: Santimetre başına ters dalga sayısı

KPO: Kontrol/para-aramid kumaştan iplik çekme ve sürtünme testi numuneleri

BPO: nanobor karbür/para-aramid kumaştan iplik çekme ve sürtünme testi numuneleri

MPO: Çok duvarlı karbon nanotüpler/para-aramid kumaştan iplik çekme ve sürtünme testi numuneleri

GPO: Grafen nano plakalar/para-aramid kumaştan iplik çekme ve sürtünme testi numuneleri

gCPO: Kimyasal buhar biriktirme ile büyütülmüş Çok duvarlı karbon nanotüpler/para-aramid kumaştan iplik çekme ve sürtünme testi numuneleri

PPO: Plazma işlemi uygulanmış para-aramid kumaştan iplik çekme ve sürtünme testi numuneleri

RPO: Kimyasal maddelerden uzaklaştırılmış para-aramid kumaştan iplik çekme ve sürtünme testi numuneleri

MGS L326: Epoksi reçine

MGS H265: Epoksi sertleştiricisi

nh-B₄C: Nano hegzagonal bor karbür

MWCNTs: Çok duvarlı karbon nanotüp

GNPs: Grafen nanoplakalar

FESEM: Alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu

CVD: Kimyasal buhar biriktirme

PECVD: Kimyasal buhar biriktirme destekli plazma

gCPO: Karbon nanotüp büyütmeli para-aramid kumaş

Fe (NO₃)₃·9 H₂O: Demir (III) nitrat nonahidrat

Co(NO₃)₂·6H₂O: Kobalt (II) nitrat hegzahidrat

Torr: Basınç birimi

RF: Radyo frekansı

Sccm: Standart cm³/dakika

Pull-out: Kumaştan ipik çekme

MPa: Mega paskal

GPa: Gega paskal

TPa: Tera paskal

CAI: Darbeden sonra basma

CALVI: Düşük hızda düşürme sonrası basma testi

FSP: Parçacık tesirli mermi

FPS: Yüksek hızlı kamera

EDX: Enerji dağılımlı X-ışını

FTIR: Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi

RAMAN: Raman spektroskopisi

TGA/DTA: Termogravimetrik analiz / Diferansiyel termal analiz

XRD: X-ışını difraksiyonu

Krimp: Kumaş yapısındaki çözgü ve atkı iplikleri üzerindeki kıvrım

TOW: Bükümsüz sürekli filament demetleri

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Nanobalistik, nanokompozit ve nanoçekme (pul-out)'da kullanılan lif [230], kumaş, reçine ve nano malzemelerin [231-235] özellikleri.	24
Tablo 2.2. Kumaştan iplik çekme testi için geliştirilmiş nano kaplamalı p-aramid yapıların özellikleri.....	26
Tablo 2.3. Büyütülmüş çok duvarlı karbon nanotüplerin ağırlık-hacim oranları.	32
Tablo 2.4. Plazma işlemi ile p-aramid kumaşta kütle kaybı sonuçları.....	35
Tablo 2.5. Nano katkılı p-aramid/epoksi kompozitler üzerinde yapılan statik mekanik testler.	46
Tablo 2.6. Dinamik balistik, düşük hızlı darbe, darbe sonrası basma testleri için nano katkılı p-aramid/epoksi kompozitler.	54
Tablo 2.7. Yoğunluk ve lif hacmi testleri için nano katkılı p-aramid/epoksi kompozitler.	66
Tablo 3.1. Nano katkılı para-aramid/epoksi kompozit yapıların ortalama yoğunluk ve lif hacim verileri.....	71
Tablo 3.2. Nano kaplı p-aramid kumaş yapıları için tek ve çoklu maksimum çekme kuvveti-yer değiştirme, ilk iplik çıkma kuvveti ve intra-iplik kayma dayanımı.	78
Tablo 3.3. Nano kaplı p-aramid kumaş yapıları için tek ve çoklu pull-out enerji sonuçları.	80
Tablo 3.4. CVD ve PECVD p-aramid kumaş yapıları için tek ve çoklu maksimum çekme kuvveti-yer değiştirme, ilk iplik çıkma kuvveti ve intra-iplik kayma dayanımı.	86
Tablo 3.5. CVD ve PECVD p-aramid kumaş yapıları için tek ve çoklu pull-out enerji sonuçları.	87
Tablo 3.6. Nano kaplamalı p-aramid kumaşların kuru ve ıslak formdaki tekli ve çoklu (2- ve 3-iplik ucu) statik ve kinetik sürtünme katsayıları.	88
Tablo 3.7. CVD, PECVD ve kimyasal kaplaması uzaklaştırılmış p-aramid kumaşların kuru ve ıslak formdaki tekli ve çoklu (2- ve 3-iplik ucu) statik ve kinetik sürtünme katsayıları.	89
Tablo 3.8. Para-aramid/epoksi balistik plaka için çoklu atış sonuçları ve sönmölenen enerji değöerleri.....	90

Tablo 3.9. Para-aramid/epoksi balistik plaka için çoklu atış sonrası bozunma boyutları ve bozunma boyutları üzerinden sönümlenen enerji değerleri.	90
Tablo 3.10. Para-aramid/epoksi balistik plaka için çoklu atış sonrası çözgü, atk ve kalınlık boyunca lokal artık şekil değışimi ve bozunan katman sayısı.	91
Tablo 3.11. Para-aramid/epoksi balistik plaka için çoklu atış sonrası çıkış FSP üzerinden lokal dinamik bozunma boyutları.....	91
Tablo 3.12. Nano B ₄ C katkılı para-aramid/epoksi balistik plaka için çoklu atış sonuçları ve sönümlenen enerji değeri.	92
Tablo 3.13. Nano B ₄ C katkılı para-aramid/epoksi balistik plaka için çoklu atış sonrası bozunma boyutları ve bozunma boyutları üzerinden sönümlenen enerji değeri.	92
Tablo 3.14. Nano B ₄ C katkılı para-aramid/epoksi balistik plaka için çoklu atış sonrası çözgü, atk ve kalınlık boyunca lokal artık şekil değışimi ve bozunan katman sayısı.....	93
Tablo 3.15. Nano B ₄ C katkılı para-aramid/epoksi balistik plaka için çoklu atış sonrası çıkış FSP üzerinden lokal dinamik bozunma boyutları.....	93
Tablo 3.16. Çözgü ve atk yönü nano B ₄ C katkılı para-aramid/epoksi balistik plaka için statik katarası aksiyal basma verileri.....	94
Tablo 3.17. Çözgü ve atk yönü nano B ₄ C katkılı para-aramid/epoksi balistik plaka için statik katarası kalınlık basma verileri.....	96
Tablo 3.18. Nano kompozit üzerine ağırlık düşürme sonucu elde edilen veriler.	97
Tablo 3.19. Nano kompozit üzerine ağırlık düşürme sonrası basma (CALVI) sonucu elde edilen veriler.....	99
Tablo 3.20. Nano kompozit üzerine statik çekme yükü sonucu elde edilen veriler.....	102
Tablo 3.21. Nano kompozit üzerine statik basma yükü sonucu elde edilen veriler.....	104
Tablo 3.22. Nano kompozit üzerine statik eğilme yükü sonucu elde edilen veriler.	106
Tablo 3. 23. Nano kompozit üzerine statik katarası kayma yükü sonucu elde edilen veriler.	108

ŞEKİLLER LİSTESİ

- Şekil 2.1. Para-aramid bezayağı(1/1) kumaşın sırası ile şematik örgü ve gerçek kumaş görünümleri. 23
- Şekil 2.2. (a) Para-aramid kumaşın yüzey görüntüsü (optik mikroskop, büyütme: 6,7×), (b) Nano hegzagonal B₄C'nin görüntüsü (FESEM, ölçek: 200 nm; büyütme: 20000×), (c) MWCNT'lerin görüntüsü (FESEM, ölçek: 200 nm; büyütme: 30000×) ve (d) GNP'lerin görüntüsü (FESEM, ölçek: 200 nm; büyütme: 20000×).....25
- Şekil 2.3. Bu tez kapsamında geliştirilen ve “ardıl sıkıştırma yöntemi” (iterative compression method) olarak adlandırılan çeşitli nano kaplamalı p-aramid yapılar (Dijital fotoğraf). 27
- Şekil 2.4. (a) Kimyasal buhar biriktirme(CVD) işlemiyle para-aramid kumaş yüzeyinde çok duvarlı karbon nanotüp büyütme, (b) plazma işlemi (PECVD) ile kumaş yüzeyini prüzlendirme, (c) CVD işleminde p-aramid kumaş üzerine MWCNTs büyütme haznesi, (d) Para-aramid kumaşa plazma uygulama haznesi (Dijital fotoğraf). 29
- Şekil 2.5. (a) P-aramid kumaşının sıcaklık altında kimyasalların uzaklaştırılma diyagramı, (b) Katalizörle kaplanmış p-aramid kumaşın kurutulma diyagramı, (c) CVD tekniğinde MWCNT'lerin büyüme sürecinde sıcaklık-zaman diyagramı.....31
- Şekil 2.6. (a) P-aramid kumaşının sıcaklık altında kimyasalların uzaklaştırılma diyagramı, (b) PECVD tekniğinde plazma uygulama sıcaklık-zaman diyagramı. 34
- Şekil 2.7. Nanobalistik ve nanokompozit üretim adımları (Dijital fotoğraf). 36
- Şekil 2.8. (a) P-aramid kumaşın nem ve kimyasalların uzaklaştırılmasını gösteren sıcaklık-zaman diyagramı ve (b) P-aramid/epoksi nano B₄C katkılı kompozit ve nano balistik plakaların üretim süreçlerini gösterir sıcaklık-zaman diyagramı.....38
- Şekil 2.9. Nano B₄C katkılı p-aramid/epoksi kompozit balistik plakaların birleşim sürecini gösterir sıcaklık-zaman diyagramı. 40
- Şekil 2.10. (a) Sekiz katmanlı nano bor karbür p-aramid/epoksi balistik plaka ve (b) Sekiz katmanlı kontrol p-aramid/epoksi balistik plaka (Dijital fotoğraf). 40
- Şekil 2.11. (a) Kumaştan iplik çekme için nano B₄C kumaş örneği, (b) İplik çekme testi için örneğin hazır hale getirilmesi, (c) Kumaş ortasından tek iplik çekimi, (d) Kumaştan 3 ipliğin aynı anda çekilmesi, (e) Tek iplik çekiminde GNPs kaplı

kumaşta gerçekleşen çekim izi ve (f) Üç iplik çekiminde GNPs kaplı kumaşın oluşturduğu iz.	41
Şekil 2.12. İplik çekme numunesinin boyutları ve iplik çekme planı.....	42
Şekil 2.13. (a) Nano B ₄ C kaplamalı iplikte tekli uç sürtünmesi (b) Nano B ₄ C kaplamalı iplikte üç iplik uç sürtünmesi.....	44
Şekil 2.14. (a) Sürtünme cihazının şematik görünümü ve (b) Sürtünme cihazının şematik iğneli sarım ünitesi.....	44
Şekil 2.15. (a) Çekme testi cihazı (b) Nano katkılı para-aramid/epoksi kompozit yapının çekme testi sırasındaki görünümü (c) Para-aramid/epoksi (kontrol) kompozit yapının çekme testi sırasındaki görünümü.	47
Şekil 2.16. (a) Nano katkılı para-aramid/epoksi kompozit yapıların fikstür yardımı ile basma testi işlemi (b) Fikstür ve numunenin test sonrası yakın çekim görüntüsü.	48
Şekil 2.17. (a) Para-aramid/epoksi kompozit yapının (kontrol) 3-nokta eğme fikstüründe eğilme testine başlama konumu (b) Nano katkılı para-aramid/epoksi kompozit yapının test esnasındaki eğilme işlemi.	50
Şekil 2.18. (a) Para-aramid/epoksi kompozit yapının (kontrol) fikstür yardımı ile kısa kiriş eğme testi ve (b) Nano katkılı para-aramid/epoksi kompozit yapının test esnasındaki bozunması.	51
Şekil 2.19. Para-aramid/epoksi kompozit yapının (8 katlı) fikstür yardımı ile katarası basma (aksiyal) testi işlemi.....	52
Şekil 2.20. (a) Basma cihazı, (b) Basma cihazında örneğin yerleştirildiği fikstürün yakından görünümü ve (c) Kontrol ve nano katkılı B ₄ C para-aramid/epoksi kompozit yapıların (8 katlı) katarası basma (kalınlık) testi işlemi için kesilerek hazırlanmış numuneler.	53
Şekil 2.21. (a) Ağırlık düşürme testi cihazı. (b) Ağırlık düşürme testinin uygulandığı fikstür ve numune bölgesi. (c) Ağırlık düşürme testinin uygulandığı nano B ₄ C katkılı p-aramid/epoksi kompozit yapı. (d) Ağırlık düşürme testinin uygulandığı p-aramid/epoksi kompozit yapı (kontrol).	55
Şekil 2.22. (a) Fikstüre yerleştirilmiş, düşürme sonrası basma testinin uygulanacağı nano katkılı kompozit yapı. (b) Fikstüre yerleştirilmiş, düşürme sonrası basma testinin uygulanacağı kompozit yapı (kontrol) (Dijital fotoğraf).	56

Şekil 2.23. Nano bor karbür katkılı p-aramid/epoksi ve kontrol kompozitler üzerinde yapılan parçacık tesirli mermi (FSP) atışları için kullanılan tek kademeli gaz silahı sistemi.	57
Şekil 2.24. (a) Kapsül parçaları (b) Parçacık tesirli mermi (FSP) (c) Kapsül içerisinde FSP (sabot)	58
Şekil 2.25. (a) Balistik atış testi için kullanılan helyum gazı tüpleri (b) Basınç yetersizliğinde devreye giren basınç yükseltici kompresör (c) Bilgisayarlı ateşleme ve hız ölçüm sistemi (d) FSP çıkış hızı ölçümü için kullanılan bilgisayarlı yüksek hızlı kamera (Dijital fotoğraf).....	58
Şekil 2.26. (a) Atışlarda kullanılan çentikli diyafram (b) Atış sonrası basınç altında kullanılan çift diyaframlar.	59
Şekil 2.27. Atıştan önce atış tankı içerisinde atış fiktürü ve nano balistik kompozit malzeme.....	60
Şekil 2.28. FSP nin hedefi delip çıkışını gösteren foto ve burada referans çizelge cetveli yardımı ile çıkış hızı hesaplamaları ile birlikte kameranın hesapladığı örneğin süre, mesafe gibi çıktılar.	61
Şekil 2.29. (a) FESEM cihazı ve görüntü işleme alanı (b) FESEM cihazının numune giriş bölümü.....	62
Şekil 2.30. Optik mikroskop ve numune ile bilgisayardaki görüntüsü.....	63
Şekil 2.31. FTIR cihazı ve örnek ölçümlerin bilgisayarlı ortamda Exel formatında verilerin ileriki işlemler için depolanması.	63
Şekil 2.32. RAMAN spektroskopisi cihazı.....	64
Şekil 2.33. TGA/DTA cihazı.	65
Şekil 2.34. (a) XRD cihazı ve bilgisayarlı ekran görüntüsü ve (b) XRD cihazının numune tutucu iç bölümü.	65
Şekil 2.35. (a) Nano kompozitler üzerinde deneysel yoğunluk ölçümü için kullanılan cihaz ve (b) Cihazın su dolu iç bölümü test esnasında görülmektedir.....	67
Şekil 2.36. Kompozit malzemelerdeki bileşen içeriklerini belirlemek için uygulanan sıcaklık-zaman grafiği.	68
Şekil 2.37. (a) Lif hacmi ölçümü için kullanılan kül fırını ve (b) Yakma işlemi sonrası kül fırının iç haznesi.	69
Şekil 3.1. Nano kaplı p-aramid kumaş yapılar. (a) Nano B ₄ C kaplı kumaş (optik mikroskop, OP), (b) Nano B ₄ C kaplı kumaş (FESEM, ölçek: 2 µm), (c) MWCNTs	

- kaplı kumaş (OP), (d) MWCNTs kaplı kumaş (FESEM, ölçek: 2 μm), (e) GNPs kaplı kumaş (OP), (f) GNPs kaplı kumaş (FESEM, ölçek: 2 μm), (g) kontrol kumaş yüzeyi (OP) ve (h) kontrol kumaş yüzeyi (FESEM, ölçek: 10 μm). 73
- Şekil 3.2. Nano kaplı p-aramid kumaşların enerji dağılımlı X-ışını (EDX) analiz verileri. (a) Nano B₄C kaplama kumaş, (b) MWCNTs kaplama kumaş, (c) GNPs kaplama kumaş ve (d) Kontrol kumaş. 74
- Şekil 3.3. Fourier dönüşüm kızılötesi spektroskopisi verileri. (a) Nano h-B₄C kaplı kumaş, (b) MWCNTs kaplı kumaş ve (c) GNPs kaplı kumaş. 75
- Şekil 3.4. Nano kaplı p-aramid lif, nanoparçacıklar ve kontrol p-aramid lifine ait Raman spektrumları ve haritalamaları. (a-c) Nano B₄C kaplı p-aramid kumaş, (d-f) MWCNTs kaplı kumaş, (g-i) GNPs kaplı kumaş. 76
- Şekil 3.5. Nano kaplı p-aramid kumaş yapılar, nanoparçacıklar ve kontrol p-aramid lifine ait X-ışını kırınım spektrumu sonuçları. (a) Nano h-B₄C kaplı p-aramid kumaş, (b) MWCNTs kaplı kumaş, (c) GNPs kaplı kumaş. 77
- Şekil 3.6. Nano kaplı p-aramid kumaş, nanoparçacıklar ve kontrol p-aramid lifine ait termogravimetrik analiz (TGA) sonuçları. (a) Nano h-B₄C kaplı p-aramid kumaş, b) Kontrol p-aramid kumaş ve (c) Nano B₄C. 77
- Şekil 3.7. Nano kaplı p-aramid kumaş yapıları için tek iplik ve çoklu iplik (2-uçlu ve 3-uçlu) ardışık pull-out kuvveti (N)-yer değiştirme (mm) grafikleri. (a1, b1, c1) Nano B₄C kaplı p-aramid kumaş (BPO), (a2, b2, c2) MWCNT kaplı p-aramid kumaş (MPO), (a3, b3, c3) GNP kaplı p-aramid kumaş ve (a4, b4, c4) Kontrol kumaşı. 79
- Şekil 3.8. CVD ve PECVD işlemleri ile muamele edilmiş p-aramid kumaş yapılarına ait yüzey morfolojileri. (a) CVD ile karbon nanotüp büyütmeli (MWCNTs) p-aramid kumaş, (b) Plazma işlemi görmüş kumaş yüzeyi, (c) Yüzey kimyasalı uzaklaştırılmış kumaş (Optik mikroskop), (d) Filament yüzeyinde büyütülmüş MWCNTs (FESEM, ölçek: 2 μm , büyütme: 200x), (e) Plazma sonucu küçük çaplı filament bozunmaları (FESEM, ölçek: 20 μm , büyütme: 200x) ve (f) Yüzey kimyasalı uzaklaştırılmış kumaş yüzeyi (FESEM, ölçek: 100 μm , büyütme: 33x). 81
- Şekil 3.9. Karbon nanotüp büyütmeli ve plazma muameleli p-aramid kumaşların enerji dağılımlı X-ışını (EDX) analiz verileri. (a) MWCNTs büyütmeli kumaş, (b) Plazma muameleli kumaş ve (c) Kimyasal kaplaması uzaklaştırılmış p-aramid kumaş.... 82

- Şekil 3.10. Karbon nanotüp büyütme, plazma muameleli, yüzey kaplaması uzaklaştırılmış ve kontrol kumaşın fourier dönüşüm kızılötesi spektroskopisi verileri. 83
- Şekil 3.11. Karbon nanotüp büyütme, plazma muameleli, yüzey kaplaması uzaklaştırılmış ve kontrol kumaşın raman spektroskopisi verileri. 84
- Şekil 3.12. Karbon nanotüp büyütme, plazma muameleli, yüzey kaplaması uzaklaştırılmış ve kontrol p-aramid lifine ait X-ışını kırınım spektrumu sonuçları. 84
- Şekil 3.13. CVD, PECVD ve kimyasal kaplama uzaklaştırılmış p-aramid lifine ait termogravimetrik analiz (TGA) sonuçları. (a) CVD p-aramid kumaş, b) PECVD p-aramid kumaş ve (c) Kimyasal kaplaması uzaklaştırılmış p-aramid kumaş. 85
- Şekil 3.14. CVD ve PECVD p-aramid kumaş yapıları için tek iplik ve çoklu iplik (2 uçlu ve 3 uçlu) ardışık pull-out kuvveti (N)-yer değiştirme (mm) grafikleri. (a1,b1,c1) MWCNTs büyütülmüş p-aramid kumaş (gCPO), (a2,b2,c2) Plazma uygulanmış p-aramid kumaş (PPO), (a3,b3,c3) Kimyasal kaplaması uzaklaştırılmış p-aramid kumaş. 86
- Şekil 3.15. Nano h-B₄C katkılı para-aramid/epoksi balistik plaka için statik katarası basma (aksiyal)-çözgü grafikleri. (a) Kontrol katarası basma (aksiyal) kuvvet-uzama, (b) Kontrol katarası basma (aksiyal) gerilme-uzama(%), (c) Nano h-B₄C katarası basma (aksiyal) kuvvet-uzama ve (d) Nano h-B₄C katarası basma (aksiyal) gerilme-uzama(%) grafikleri. 95
- Şekil 3.16. Nano h-B₄C katkılı para-aramid/epoksi balistik plaka için statik katarası basma (aksiyal)-atki grafikleri. (a) Kontrol katarası basma (aksiyal) kuvvet-uzama, (b) Kontrol katarası basma (aksiyal) gerilme-uzama(%), (c) Nano h-B₄C katarası basma (aksiyal) kuvvet-uzama ve (d) Nano h-B₄C katarası basma (aksiyal) gerilme-uzama(%) grafikleri. 95
- Şekil 3.17. Nano kompozitler üzerine ağırlık düşürme kuvvet(kN)-zaman(ms) grafikleri. (a1-a3) Kontrol p-aramid/epoksi kompozit, (b1-b3) Nano B₄C p-aramid/epoksi kompozit, (c1-c3) GNPs p-aramid/epoksi kompozit, (d1-d3) Hibrit nano (B₄C ve GNPs) kompozit. 98
- Şekil 3.18. Nano kompozitler üzerine ağırlık düşürme sonrası basma kuvvet(N)-uzama(mm) ve gerilme(MPa)-uzama(%) grafikleri. (a1-a2) Kontrol p-aramid/epoksi kompozit, (b1-b2) Nano B₄C p-aramid/epoksi kompozit, (c1-c2)

GNPs p-aramid/epoksi kompozit, (d1-d2) Hibrit nano (B ₄ C ve GNPs) kompozit.	100
Şekil 3.19. Nano kompozitler üzerine statik çekme yükü sonrası kuvvet(N)-uzama(mm) ve gerilme(MPa)-uzama(%) grafikleri. (a1-a2) Kontrol p-aramid/epoksi kompozit, (b1-b2) Nano B ₄ C p-aramid/epoksi kompozit, (c1-c2) GNPs p-aramid/epoksi kompozit, (d1-d2) Hibrit nano (nh-B ₄ C ve GNPs) kompozit.....	103
Şekil 3.20. Nano kompozitler üzerine statik basma yükü sonrası kuvvet(N)-uzama(mm) ve gerilme(MPa)-uzama(%) grafikleri. (a1-a2) Kontrol p-aramid/epoksi kompozit, (b1-b2) Nano h-B ₄ C p-aramid/epoksi kompozit, (c1-c2) GNPs p-aramid/epoksi kompozit, (d1-d2) Hibrit nano (h-B ₄ C ve GNPs) kompozit.....	105
Şekil 3.21. Nano kompozitler üzerine statik eğilme yükü sonrası kuvvet(N)-uzama(mm) ve gerilme(MPa)-uzama(%) grafikleri. (a1-a2) Kontrol p-aramid/epoksi kompozit, (b1-b2) Nano h-B ₄ C p-aramid/epoksi kompozit, (c1-c2) GNPs p-aramid/epoksi kompozit, (d1-d2) Hibrit nano (h-B ₄ C ve GNPs) kompozit.	107
Şekil 3.22. Nano kompozitler üzerine statik katarası kayma yükü sonrası kuvvet(N)-uzama(mm) ve gerilme(MPa)-uzama(%) grafikleri. (a1-a2) Kontrol p-aramid/epoksi kompozit, (b1-b2) Nano h-B ₄ C p-aramid/epoksi kompozit, (c1-c2) GNPs p-aramid/epoksi kompozit, (d1-d2) Hibrit nano (h-B ₄ C ve GNPs) kompozit.	109
Şekil 4.1. Para-aramid/epoksi nanokompozit yapıların yoğunluk sonuçları.....	110
Şekil 4.2. Para-aramid/epoksi nanokompozit yapıların lif hacim sonuçları. (a) Ağırlık esaslı lif hacmi ve (b) Hacim esaslı lif hacmi.....	111
Şekil 4.3. Nano kaplamalı soft p-aramid kumaş yapısının karakteristik pull-out(N)-yer değiştirme(mm) grafiği.....	124
Şekil 4.4. Nano kaplama soft p-aramid kumaş yapılarında tekli ve çoklu iplik maksimum pull-out kuvvet-yerdeğiştirme grafikleri. (a) Tek iplik maksimum pull-out kuvvet-yer değiştirme, (b) İki iplik maksimum pull-out kuvvet-yer değiştirme, (c) Üç iplik maksimum pull-out kuvvet-yer değiştirme ve (d) Geleneksel iplik çekme dayanımı.	126
Şekil 4.5. Kimyasal buhar biriktirme(CVD) ve plazma işlemlili soft p-aramid kumaş yapılarda tekli ve çoklu iplik maksimum pull-out kuvvet-yerdeğiştirme grafikleri. (a) Tek iplik maksimum pull-out kuvvet-yer değiştirme, (b) İki iplik maksimum	

pull-out kuvvet-yer değiştirme, (c) Üç iplik maksimum pull-out kuvvet-yer değiştirme ve (d) Geleneksel iplik çekme dayanımı.....	128
Şekil 4.6. Nano B ₄ C kaplı p-aramid kumaşın pull-out kuvveti(N)-yer değiştirme(mm) grafiğinden temsili enerji sönümleme bölgelerinin tanımı.....	130
Şekil 4.7. Nano kaplama p-aramid kumaş yapısında tekli ve çoklu pull-out enerji sönümleme sonuçları. (a) Tekli iplik pull-out enerji sönümleme, (b) İki iplik pull-out enerji sönümleme ve (c) Üç iplik pull-out enerji sönümleme.	132
Şekil 4.8. CVD ve PECVD p-aramid kumaş yapısında tekli ve çoklu pull-out enerji sönümleme sonuçları. (a) Tekli iplik pull-out enerji sönümleme, (b) İki iplik pull-out enerji sönümleme ve (c) Üç iplik pull-out enerji sönümleme.	134
Şekil 4.9. Nano kaplama p-aramid kumaş yapılarında tek ve çoklu kuru ve yaş statik sürtünme katsayıları. (a) Tek iplik statik sürtünme katsayısı, (b) İki iplik statik sürtünme katsayısı ve (c) Üç iplik static sürtünme katsayısı.....	136
Şekil 4.10. CVD ve PECVD işlemlı p-aramid kumaş yapılarında tek ve çoklu kuru ve yaş statik sürtünme katsayıları. (a) Tek iplik statik sürtünme katsayısı, (b) İki iplik statik sürtünme katsayısı ve (c) Üç iplik statik sürtünme katsayısı.....	138
Şekil 4.11. Nano kaplama p-aramid kumaş yapılarında tek ve çoklu kuru kinetik sürtünme katsayıları. (a) Tek iplik kinetik sürtünme katsayısı, (b) İki iplik kinetik sürtünme katsayısı ve (c) Üç iplik kinetik sürtünme katsayısı.	140
Şekil 4.12. CVD, PECVD işlemlı ve yüzey kimyasalı uzaklaştırılmış p-aramid kumaş yapılarında tek ve çoklu kuru kinetik sürtünme katsayıları. (a) Tek iplik kinetik sürtünme katsayısı, (b) İki iplik kinetik sürtünme katsayısı ve (c) Üç iplik kinetik sürtünme katsayısı.	142
Şekil 4.13. Parçacık tesirli mermi etkisi altında para-aramid/epoksi/nh-B ₄ C balistik plaka daki farklı hızlardaki mermi giriş ve çıkış hızları(m/s). (a) Kontrol plaka ve (b) para-aramid/epoksi/nh-B ₄ C balistik plaka.	144
Şekil 4.14. Parçacık tesirli mermi etkisi altında para-aramid/epoksi/nh-B ₄ C balistik plaka daki farklı mermi giriş hızlarına(m/s) karşılık sönümlenen spesifik enerji(j). (a) Kontrol plaka ve (b) para-aramid/epoksi/nh-B ₄ C balistik plaka.	144
Şekil 4.15. Tutulan mermi hızı(m/s) üzerinden sönümlenen spesifik enerji(j) ve tutulan mermi hızı grafiği. (a) Kontrol plaka ve (b) para-aramid/epoksi/nh-B ₄ C balistik plaka.....	145

- Şekil 4.16. Para-aramid/epoksi/nh-B₄C balistik plaka ve kontrol plaka için sönümlenen spesifik enerji..... 146
- Şekil 4.17. Para-aramid/epoksi balistik plaka (kontrol) için farklı parçacık tesirli mermi hızları ile elde edilen bozunma modları (optik mikroskop, x6.7). (a1) Ön plaka bozunumu(475m/s), (a2) 3.plaka(475m/s), (b1) Ön plaka bozunumu(685m/s), (b2) 5.plaka(685m/s), (c1) Ön plaka bozunumu(752m/s), (c2) 6.plaka(752m/s), (d1) Ön plaka bozunumu(811m/s), (d2) 7.plaka(811m/s), (e1) Ön plaka bozunumu(849m/s), (e2) 8.plaka(849m/s), (f1) Ön plaka bozunumu(905m/s), (f2) 8.plaka(905m/s), (g1) Ön plaka bozunumu(958.7m/s), (g2) 8.plaka(958.7m/s), (h1) Ön plaka bozunumu(978m/s), (h2) 8.plaka(978m/s)..... 148
- Şekil 4.18. Para-aramid/epoksi/nh-B₄C balistik plaka için farklı parçacık tesirli mermi hızları ile elde edilen bozunma modları(optik mikroskop, x6.7). (a1) Ön plaka bozunumu(518.6m/s), (a2) 3.plaka(518.6m/s), (b1) Ön plaka bozunumu(633.2m/s), (b2) 5.plaka(633.2m/s), (c1) Ön plaka bozunumu(732.7m/s), (c2) 6.plaka(732.7m/s), (d1) Ön plaka bozunumu(814.6m/s), (d2) 7.plaka(814.6m/s), (e1) Ön plaka bozunumu(913.4m/s), (e2) 8.plaka(913.4m/s), (f1) Ön plaka bozunumu(1015.2m/s), (f2) 8.plaka(1015.2m/s)..... 150
- Şekil 4.19. Para-aramid/epoksi/nh-B₄C nano kompozitlerin çözgü ve atkı kesiti boyunca (aksiyal) katarası basma sonuçları. (a) Çözgü-atkı boyunca katarası basma dayanımı(N), (b) Çözgü-atkı boyunca katarası basma gerilimi(MPa), (c) Çözgü-atkı boyunca katarası basma uzaması(%), (d) Çözgü-atkı boyunca katarası basma modülü(GPa). 151
- Şekil 4.20. Para-aramid/epoksi kompozitlerde (NBKWIC) katarası basma (aksiyal) bozunma modları. (a) NBKWIC yapıda katarası açılma ve bölgesel plaka burkulması (Dijital foto), (b) NBKWIC yapıda katarası açılma ve lokal plaka burkulmanın kumaş katmanı üzerinde görünümü (Optik mikroskop x6.7) ve (c) Kumaş katmanındaki çözgü ipliği ve filamentlerin burkulması (FESEM x100).152
- Şekil 4.21. Para-aramid/epoksi nano kompozitlerde (NBBWIC) katarası basma (aksiyal) bozunma modları. (a) NBBWIC yapıda katarası açılma ve bölgesel plaka burkulması (Dijital foto), (b) NBBWIC yapıda katarası açılma ve bölgesel plaka burkulmanın kumaş katmanı üzerinde görünümü (Optik mikroskop x6.7) ve (c) Kumaş katmanındaki çözgü ipliği ve filamentlerin burkulması ve bozunması (FESEM x200)..... 153

- Şekil 4.22. Para-aramid/epoksi/nh-B₄C nano kompozitlerin çözgü ve atkı düzleminde (kalınlık) katarası basma sonuçları. (a) Çözgü-atkı düzleminde katarası basma dayanımı(N), (b) Çözgü-atkı düzleminde katarası basma gerilimi(MPa). 155
- Şekil 4.23. Para-aramid/epoksi kompozitlerde (NBKWCT) katarası basma (kalınlık) bozunma modları. (a) NBKWCT yapıda katarası açılma ve lokal plaka bozunması (dijital foto), (b) NBKWCT yapıda katarası açılma ve lokal matris-lif bozunma görünümü (optik mikroskop x6.7) ve (c) Kumaş katmanındaki çözgü ipliği ve filamentlerde çoklu matris ve filament kırılmaları (FESEM x200). 156
- Şekil 4.24. Para-aramid/epoksi nano kompozitlerde (NBBWCT) katarası basma (kalınlık) bozunma modları. (a) NBBWCT yapıda katarası açılma ve lokal plaka bozunması (dijital foto), (b) NBBWCT yapıda katarası açılma ve lokal matris-lif bozunma görünümü (optik mikroskop x6.7) ve (c) Kumaş katmanındaki çözgü ipliği ve filamentlerde çoklu çekme esaslı filament kırılmaları (FESEM x200). 157
- Şekil 4.25. (a) Para-aramid/epoksi nano kompozitlerde ağırlık düşürme yüklemesi sonucu maksimum kuvvet(kN) ve (b) Bozunan alan(mm²) sonuçları. 158
- Şekil 4.26. Para-aramid/epoksi nano kompozitlerde ağırlık düşürme yüklemesi sonucu bozunan alan(mm²) sonuçları. (a1 ve a2) Para-aramid/epoksi kompozit sırası ile bozunan ön yüz ve arka yüz(dijital foto), (a3 ve a4) Büyütülmüş sırası ile bozunan ön ve arka yüz(optik mikroskop x6.7), (b1 ve b2) Para-aramid/epoksi nano bor karbür(B₄C) kompozit sırası ile bozunan ön yüz ve arka yüz(dijital foto), (b3 ve b4) Büyütülmüş sırası ile bozunan ön ve arka yüz(optik mikroskop x6.7), (c1 ve c2) Para-aramid/epoksi grafan nano plaka(GNPs) kompozit sırası ile bozunan ön yüz ve arka yüz(dijital foto), (c3 ve c4) Büyütülmüş sırası ile bozunan ön ve arka yüz(optik mikroskop x6.7), (d1 ve d2) Para-aramid/epoksi hibrit nano bor karbür(B₄C)/grafan nano plaka(GNPs) kompozit sırası ile bozunan ön yüz ve arka yüz(dijital foto) ve (d3 ve d4) Büyütülmüş sırası ile bozunan ön ve arka yüz(optik mikroskop x6.7). 159
- Şekil 4.27. Para-aramid/epoksi nano kompozitlerde ağırlık düşürme sonrası basma (CALVI) sonuçları. (a) CALVI basma dayanımı(N), (b) CALVI basma gerilimi (MPa), (c) CALVI basma uzaması (%) ve (d) CALVI basma modülü (GPa) 161
- Şekil 4.28. Para-aramid/epoksi nano kompozitlerde ağırlık düşürme yüklemesi sonrası basma bozunma modları. (a1 ve a2) Para-aramid/epoksi kompozit sırası ile bozunan ön yüz ve arka yüz(dijital foto), (a3 ve a4) Büyütülmüş sırası ile bozunan çözgü

yönü kesit (optik mikroskop x6.7, FESEM x35), (b1 ve b2) Para-aramid/epoksi nano bor karbür(B₄C) kompozit sırası ile bozunan ön yüz ve arka yüz(dijital foto), (b3 ve b4) Büyütülmüş sırası ile bozunan çözgü yönü kesit (optik mikroskop x6.7, FESEM x35), (c1 ve c2) Para-aramid/epoksi grafan nano plaka(GNPs) kompozit sırası ile bozunan ön yüz ve arka yüz(dijital foto), (c3 ve c4) Büyütülmüş sırası ile bozunan çözgü yönü kesit(optik mikroskop x6.7, FESEM x35), (d1 ve d2) Para-aramid/epoksi hibrit nano bor karbür(B₄C)/grafan nano plaka(GNPs) kompozit sırası ile bozunan ön yüz ve arka yüz(dijital foto) ve (d3 ve d4) Büyütülmüş sırası ile bozunan çözgü yönü kesit(optik mikroskop x6.7, FESEM x35)..... 163

Şekil 4.29. Para-aramid/epoksi nano kompozitlerde statik çekme sonuçları. (a) Çekme gerilmesi (MPa), (b) Çekme uzaması (%) ve (c) Çekme modül değerleri (GPa) 164

Şekil 4.30. Para-aramid/epoksi nano kompozitlerde statik çekme sonrası bozunma modları. (a1 ve a2) Para-aramid/epoksi kompozit sırası ile bozunan ön yüz ve çözgü boyu kesit(dijital foto), (a3 ve a4) Büyütülmüş sırası ile bozunan çözgü yönü kesit ve ön yüz (optik mikroskop x6.7, FESEM x35), (b1 ve b2) Para-aramid/epoksi nano bor karbür(B₄C) kompozit sırası ile bozunan ön yüz ve çözgü boyu kesit(dijital foto), (b3 ve b4) Büyütülmüş sırası ile bozunan çözgü yönü kesit ve ön yüz (optik mikroskop x6.7, FESEM x35), (c1 ve c2) Para-aramid/epoksi grafan nano plaka(GNPs) kompozit sırası ile bozunan ön yüz ve çözgü yönü kesit(dijital foto), (c3 ve c4) Büyütülmüş sırası ile bozunan çözgü yönü kesit ve ön yüz(optik mikroskop x6.7, FESEM x35), (d1 ve d2) Para-aramid/epoksi hibrit nano bor karbür(B₄C)/grafan nano plaka(GNPs) kompozit sırası ile bozunan ön yüz ve çözgü yönü kesit(dijital foto) ve (d3 ve d4) Büyütülmüş sırası ile bozunan çözgü yönü kesit ve ön yüz(optik mikroskop x6.7). 166

Şekil 4.31. Para-aramid/epoksi nano kompozitlerde statik basma sonuçları. (a) Basma dayanımı(N), (b) Basma gerilmesi(MPa), (c) Basma uzaması(%) ve (d) Basma modül değerleri(GPa) 168

Şekil 4.32. Para-aramid/epoksi nano kompozitlerde statik basma sonrası bozunma modları. (a1 ve a2) Para-aramid/epoksi kompozit sırası ile bozunan ön yüz ve çözgü boyu kesit(dijital foto), (a3 ve a4) Büyütülmüş sırası ile bozunan çözgü yönü kesit(optik mikroskop x6.7, FESEM x35), (b1 ve b2) Para-aramid/epoksi nano bor karbür(B₄C) kompozit sırası ile bozunan ön yüz ve çözgü boyu kesit(dijital foto), (b3 ve b4) Büyütülmüş sırası ile bozunan çözgü yönü kesit (optik mikroskop x6.7,

FESEM x35), (c1 ve c2) Para-aramid/epoksi grafan nano plaka(GNPs) kompozit sırası ile bozunan ön yüz ve çözgü yönü kesit(dijital foto), (c3 ve c4) Büyütülmüş sırası ile bozunan çözgü yönü kesit(optik mikroskop x6.7, FESEM x200), (d1 ve d2) Para-aramid/epoksi hibrit nano bor karbür(B₄C)/grafan nano plaka(GNPs) kompozit sırası ile bozunan ön yüz ve çözgü yönü kesit(dijital foto) ve (d3 ve d4) Büyütülmüş sırası ile bozunan çözgü yönü kesit(optik mikroskop x6.7, FESEM x200)..... 170

Şekil 4.33. Para-aramid/epoksi nano kompozitlerde statik eğilme sonuçları. (a) Eğilme gerilmesi (MPa), (b) Eğilme uzaması (%) ve (c) Eğilme modül değerleri (GPa)171

Şekil 4.34. Para-aramid/epoksi nano kompozitlerde statik eğilme yükü sonrası bozunma modları. (a1 ve a2) Para-aramid/epoksi kompozit sırası ile bozunan ön yüz ve çözgü boyu kesit(dijital foto), (a3 ve a4) Büyütülmüş sırası ile bozunan çözgü yönü kesit(optik mikroskop x6.7, FESEM x200), (b1 ve b2) Para-aramid/epoksi nano bor karbür(B₄C) kompozit sırası ile bozunan ön yüz ve çözgü boyu kesit(dijital foto), (b3 ve b4) Büyütülmüş sırası ile bozunan çözgü yönü kesit (optik mikroskop x6.7, FESEM x200), (c1 ve c2) Para-aramid/epoksi grafan nano plaka(GNPs) kompozit sırası ile bozunan ön yüz ve çözgü yönü kesit(dijital foto), (c3 ve c4) Büyütülmüş sırası ile bozunan çözgü yönü kesit(optik mikroskop x6.7, FESEM x200), (d1 ve d2) Para-aramid/epoksi hibrit nano bor karbür(B₄C)/grafan nano plaka(GNPs) kompozit sırası ile bozunan ön yüz ve çözgü yönü kesit(dijital foto) ve (d3 ve d4) Büyütülmüş sırası ile bozunan çözgü yönü kesit(optik mikroskop x6.7, FESEM x200)..... 173

Şekil 4.35. Para-aramid/epoksi nano kompozitlerde statik katarası kayma sonuçları. (a) Katarası kayma dayanımı (N), (b) Katarası kayma gerilimi (MPa) ve (c) Katarası kayma uzaması (mm)..... 174

Şekil 4.36. Para-aramid/epoksi nano kompozitlerde statik katarası kayma testi sonrası bozunma modları. (a1 ve a2) Para-aramid/epoksi kompozit sırası ile bozunan ön yüz ve çözgü boyu kesit(dijital foto), (a3 ve a4) Büyütülmüş sırası ile bozunan çözgü yönü kesit(optik mikroskop x6.7, FESEM x35), (b1 ve b2) Para-aramid/epoksi nano bor karbür(B₄C) kompozit sırası ile bozunan ön yüz ve çözgü boyu kesit(dijital foto), (b3 ve b4) Büyütülmüş sırası ile bozunan çözgü yönü kesit (optik mikroskop x6.7, FESEM x5000), (c1 ve c2) Para-aramid/epoksi grafan nano plaka(GNPs) kompozit sırası ile bozunan ön yüz ve çözgü yönü kesit(dijital foto),

(c3 ve c4) Büyütölmüş sırası ile bozunan çözgü yönü kesit(optik mikroskop x6.7, FESEM x200), (d1 ve d2) Para-aramid/epoksi hibrit nano bor karbür(B₄C)/grafan nano plaka(GNPs) kompozit sırası ile bozunan ön yüz ve çözgü yönü kesit(dijital foto) ve (d3 ve d4) Büyütölmüş sırası ile bozunan çözgü yönü kesit(optik mikroskop x6.7, FESEM x200)..... 176



GİRİŞ

Genel olarak, düşük, orta ya da yüksek hızda mermi ya da parçacık tesirli balistik tehlikelere karşı direnci geliştirilmiş malzemeler, karbon, cam ve para-aramid gibi yüksek performanslı lifler ve dayanıklı termoset, fenolik ya da termoplastik matrisler, geleneksel iki boyutlu kumaşlar (2D) ve üç boyutlu (3D) kumaş mimarileri [1] formunda, katmanlar arası hibritleşme [2], çeşitli yüzey işlemleri [3] ve lif ile matris arasında güçlü kimyasal bağlar ve mekanik-fiziksel etkileşim sağlayan fonksiyonelleştirme [4,3], kaplama [5], plazma [6], aşılama [7], nanoyapıların büyütülmesi [8] ve özellikle karbon nanotüpler (CNTs) [9], grafen nano plakalar (GNPs) [10,11], nano bor karbür (nh-B₄C) esaslı katkılar [12-15], nano silikalı kayma kalınlaşma sıvıları (STF) [16,17], nanolifler [18-20] gibi maddelerin kullanımı ile geliştirilir. Bu süreçler, çok işlevli esnek veya sert [21] ve hafif nanobalistik malzemeler üretmek için balistik sınırı artırmayı hedefler [22-25].

Balistik, çeşitli enerji kaynakları (katı/sıvı/gaz yakıt ya da daha yeni olarak elektriksel/elektromanyetik/ışık/lazer kaynakları) [1,26] tarafından itilen mermi/parçacık hareketini inceleyen uygulamalı fiziğin bir dalıdır.

Balistik tehditlere karşı kişisel veya ekipman koruması için tekstil kumaşları yumuşak (soft) veya sert (rigid plate) formlarda kullanılır. Gerekli performans özellikleri arasında hafiflik, yüksek balistik/delme performansı, düşük maliyet ve konfor bulunur. Bu gereklilikler, genellikle yüksek performanslı lifler/matrisler ve iki boyutlu (2D) ile üç boyutlu (3D) gibi katmanlı tekstil yapıları kullanılarak sağlanmaktadır. Son dönemlerde, özel nano malzemelerin kullanımı balistik performansı artırmada etkili olduğu gösterilmiştir.

Günümüzde çok fonksiyonlu malzemelerin çeşitli alanlarda kullanılmak üzere geliştirilmesi, nanobilim ve nanoteknolojideki gelişmeler sayesinde gerçekleşmektedir.

Bu açıdan yüksek performanslı ve spesifik özellikleri iyileştirilmiş yüksek modüllü ve uzamayan liflerle (stiff fiber), toklaştırılmış matrislerin (resin) gelişmesi bir yandan sürerken, diğer yandan yüzey alanı çok büyük ve fonksiyonlanmış nano büyüklükteki parçacık/tüp/plaka/liflerin katkı maddesi olarak farklı tekniklerle lif/matrise entegre edilmesi, sıra dışı performanslı malzemelerin ortaya çıkmasına yol açmaktadır. Böyle nano katkılı malzemeler her ne kadar laboratuvar koşullarında geliştirilse de yakın gelecekte bunların makro ölçekte kullanımı belki de çok fonksiyonlu olması örneğin hafif ve spesifik yüksek termal-mekanik-balistik dayanım, kendini onaran, radara yakalanmayan vs. nedeni ile özellikle uzay/havacılık araçlarında geleneksel malzemelerin yerini alacağı tahmin edilmektedir.

Ancak, nano katkılı lif/matris malzemelerin üretiminde hala teknik zorluklar bulunmakta olup bunların aşılması umulmaktadır. Örneğin, nano parçacığın topaklanması (agglomeration), dağılımının homojen yapılamaması, işlem adımlarının uzun ve zaman alması, lifsi kumaş yapısı bozulmadan üzerinde nano büyütme yapma olasılıkları nano mühendislik (nanoengineering) kapsamında değerlendirilen teknik zorluklar olup bunların iyileştirilmesi için araştırmaların küresel ölçekte artan hızla devam edeceği tahmin edilmektedir.

Bu araştırma projesi kapsamında nano balistik yapılar geliştirilmiştir. Bu yapılar para-aramid filamentli kumaşlara katkılanan, nano hegzagonal bor karbür (nh-B₄C), nano grafen tabaklar (GNPs) ve çokduvarlı karbon nanotüp (MWCNTs) olup epoksi reçine ile bütünleşmiş bir şekilde bir araya getirilmiştir. Ayrıca, kimyasal buharlama (CVD) ve plazma depolama yöntemi (PECVD) ile p-aramid kumaşların yüzeyi kimyasal işlemlere tabi tutularak kumaş yüzeyinin nano parçacıklarla dekore edilerek sürtünme esaslı pull-out özellikleri soft balistik açısından iyileştirilmiştir. Bu çalışmalar kısmen Erciyes Üniversitesi, Nanobilim ve Nanoteknoloji Araştırma Merkezi (ERNAM) da gerçekleştirilmiştir.

Geliştirilen balistik yapılar aşamalı işlemlerle nanobalistik plakalar ve nanokompozit yapılar olarak Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Nano/Mikro Önşekil Dizayn ve Kompozit Laboratuvarında üretilmiştir. Üretilen nanokompozit yapılar üzerinde statik yük altında çekme-basma, eğme ve katarası kayma (short beam), düşük hızda çarpma (drop-weight impact) ve çarpma sonrası basma

(CALVI) testleri yapılmıştır. Nanobalistik plakalar üzerinde ise parçacık tesirli balistik testler yapılarak performansları tanımlanmıştır. Bu testler Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Balistik Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, üretilen nanokompozit yapıların üzerinde morfolojik ve kimyasal karakterizasyon testleri ve test sonrası hasarlı örnekler üzerinde dijital-optik-FESEM görselleri ile bozunma analizleri yapılarak bozunma modları ortaya çıkarılmıştır. Bu çalışmalar da kısmen Erciyes Üniversitesi Teknoloji Arştırma ve Uygulama merkezinde (ERÜTAUM) yürütülmüştür.

Bu çalışma kapsamlı olup hem soft balistik ve hemde rijid balistik üzerinde bilgiler, statik test verileri de göz önüne alınarak üretilmiş olup toplumla gelecek süreç içerisinde paylaşılacaktır. Çalışmanın eksik kalan modelleme ayağı ileriki aşamalarda hem geleneksel FEM yöntemleri (ANSYS LS-DYNA, ABAQUS) ve hem de yenilikçi yapay zeka (AI) öğrenme algoritmaları (Machine learning, Deep learning, ANN) üzerinden gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Böylelikle bu doktora tezi ileriki aşamalarda doktora sonrası çalışmalarla özellikle nanolamina konuları ile de desteklenerek devam ettirilecektir.

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR

1.1. Genel bilgiler

Yüksek performanslı sürekli filamentli kompozitler, yüksek termal, mekanik ve hasar toleransı özellikleri nedeniyle havacılık, uzay araçları ve uçaklar, insansız hava araçları (İHA), otomotiv, balistik (katı yerleştirme plakaları ve zırhlı mobil araçlar gibi) ve robotik alanlarda kullanılmaktadır [27-30]. Ancak, kalınlık doğrultusunda lif takviyesinin olmaması nedeni ile kat arası dayanım özellikleri düşüktür [31]. Kat arası dayanımını artırmak için kullanılan tekniklerden biri, tokluk artırıcı matrikslerin kullanılmasıdır. Diğer teknikler ise, kalınlık doğrultusunda liflerin, üç boyutlu (3D) dokuma [32], 3D saçörgü [33], z-çubuk [34] ve dikim işlemleri [35,36] ile üretilen önşekillere yerleştirilmesi şeklindedir. Son dönemlerde, nano parçacıklar (nanotüpler, nanoçubuklar, grafen plakalar) ve nanolifler nano kompozit üretiminde kullanılmaktadır [37-39]. Nano parçacıklar, kompozit işlemeyen önce ultrasonikasyon, karıştırma veya transfer baskı ve püskürtme gibi çeşitli yöntemlerle matrikste (genellikle reçine) dağıtılmaktadır [40]. Ayrıca, 3D baskı yöntemi de polimer kompozitlerin üretiminde kullanılmakta olup inkjet baskı, seçici lazer sinterleme, eriyik biriktirme ve 3D eklemeli üretim yöntemlerini içermektedir [41]. Nano parçacık karışımı, genellikle tek eksenli/çift eksenli kumaş formundaki önşekillere uygulanmıştır [42]. 3D tekstil kompozitler kalınlık doğrultusunda sürekli filament demetleri (TOW) nedeni ile düzlem içi özellikleri azalmıştır. Öteyandan, 2D kumaş ve 3D önşekil yapıların içerisinde rastgele dağılmış olan nanoküre, nanotüp veya nanoliflerle entegre edilmiştir. Ancak, nano parçacıkların süreksiz doğası nedeniyle kompozite gerçek bir düzlem dışı takviye sağlanamamıştır. Bu nedenle, aramid kompozitinin kalınlık doğrultusunda nano dikim (sürekli filament ile süreksiz nano parçacıkların birlikteliği) uygulaması etkili bulunmuştur [31].

1.2. Kumaştan iplik çekme (Pull-out)

Genel olarak, kumaştan iplik çekme özellikleri, koruyucu kumaş yapılarda darbe enerjisini sönmüleme de sürtünme prensibine dayalı önemli bir rol oynar [43]. Balistik darbe sırasında ipliğin kumaştan çekilme olayı, genellikle önemli bir enerji sönmüleme süreci olarak kabul edilir. P-aramid kumaşlarda balistik darbe sırasında ipliğin kumaştan çekilmesinin kumaş boyutları ve çıkarılan iplik miktarı ile ilişkili olarak değerlendirildiği, ipliklerin krimpelerin düzleşmesi ve yer değiştirme nedeniyle kritik bir enerji dağıtım mekanizması olarak çalıştığı öne sürülmüştür [44]. Kumaştan iplik çekme kuvvetlerinin, kumaş yoğunluğuna, kumaş boyutlarına ve çekilen iplik uç sayısına bağlı olduğu, birden fazla ipliğin kumaştan çekilmesi için gereken kuvvetin, tek bir ipliğin kumaştan çekilmesi ile elde edilen kuvvetten daha yüksek olduğu gösterilmiştir [45]. Ayrıca, yüksek iplik çekme kuvvetleri gösteren kumaşların, soft balistik için darbe performansını iyileştirdiği, iplik çekme kuvveti, kumaş sıklığı, krimp ve iplikler arası sürtünmenin kritik parametreler olduğu öne sürülmüştür [46]. Başka bir çalışmada, iplikler arası sürtünmenin kumaşta çekme bölgesinin genişlemesine neden olduğu, ancak ıslak koşullarda kumaştan çekme bölgesinin sınırının kayganlaştırıcı özellikleri nedeniyle daraldığı ileri sürülmüştür [47]. Ayrıca, tutunma-kayma (stick-slip) kuvveti ve birikimli (kümülatif) geri çekme kuvveti, kumaş yoğunluğu ve çekilen iplik uç sayısından etkilenmektedir. Birden fazla ipliğin kumaştan çekilmesinde tutunma-kayma kuvveti ve kümülatif geri çekme kuvveti, tek iplik çekmeden daha büyük olduğu tespit edilmiştir [48]. Son yapılan bir çalışmada, yüksek dinamik çekme hızlarında ipliğin, kümülatif geri çekme yüklemesine maruz kalmadan önce krimp nedeni ile kumaş yüzeyine yükü yaydığı, bunun da tutunma-kayma aşamasında temasın tamamen kaybı veya yetersiz zaman gecikmesi nedeniyle önemli bir kuvvet düşüşüne yol açtığı gösterilmiştir [49].

Aramid kompozitler, tabakalar arası ayrılma (delaminasyon) performanslarının zayıf olması ve çok işlevlilikten yoksun olmaları nedeniyle ağırlıklı olarak balistik uygulamalarla sınırlı kalmıştır. Aramid liflerinin polimer matrislere zayıf bağ yapması, düşük arayüzey özelliklere sahip kompozitlerin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bu nedenle, lazer ile üretilen grafen (LIG), kompozitin tabakalar arası dayanımını artırmak ve çok işlevlilik kazandırmak amacıyla aramid kumaşların yüzeyinde farklı morfolojilerle (içyapı) doğrudan büyütmüştür. Böylelikle, kat arası özelliklerin iyileşmesi

(interlaminar properties), oksitlenmiş grafitik tabakayla artan kimyasal etkileşimlere ve tabakalar arası bölgede meydana gelen bağlanmayla ilgili olduğu iddia edilmiştir [50].

Para-aramid lifi, düşük polariteye sahip olduğu için düşük ıslanabilirlik gösterir. Bu nedenle yapıştırıcılar, dokuma kumaştaki liflerin içine zorlukla nüfuz eder. Atmosferik basınçta plazma (atmospheric pressure plasma torch-APPT) işlemi, yüzey enerjisinin polar bileşenini önemli ölçüde artırır ve ıslanabilirlik iyileştirilir [51]. Geliştirilmiş yapışma sağlayan mikro-yüzey geometrisi ve kimyasal bileşimdeki değişiklikler incelendiğinde APPT ile işlem görmüş aramid kumaşlı kompozitler, her bir katmandaki lifler arasında yapıştırıcının daha fazla nüfuz etmesi ve yük transferinin daha iyi olması nedeniyle darbelere karşı artırılmış dayanım sergilediği açıklanmıştır [51]. Bir başka çalışmada, soft balistik yelek için halihazırda kullanılan yüksek performanslı lifli malzemeler, düşük yüzey sürtünmesine sahiptir ve bu durum balistik enerji sönümlenme etkinliğinde bir sorundur. İplik çekme testi, plazma-CVD yöntemi kullanılarak azot gazı (N_2) ve diklorodimetilsilan ($((CH_3)_2Cl_2Si)$) ile işlem görmüş kumaşlardan ipliklerin çekilmesine karşı direncin, işlenmemiş para-aramid kumaşa (Kevlar®, DuPont) kıyasla sırasıyla %18 ve %300 oranında arttığını göstermiştir [52]. Plazma destekli kimyasal buhar biriktirme (PCVD) yöntemiyle ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE) iplikler arasındaki sürtünmeyi artırma amaçlanmıştır. Yapılan testlerin sonuçları, iplikler arası statik sürtünme katsayısının (CSF) 0.12'den 0.23'e, kinetik sürtünme katsayısının ise 0.11'den 0.19'a yükseldiğini göstermiştir. İplikler arası artan sürtünme, ipliklerin yüzeylerinde biriken karboksil, karbonil, hidroksil ve amin grupları ile silikon içeren bileşiklerin yanı sıra daha fazla parçacık ve polar grup birikimine dayanmaktadır. Balistik performans için kritik olan ipliklerin çekme dayanımı ve çekme modülü ise sabit kalmış ve bu işlemlerden etkilenmediği öne sürülmüştür [6]. Ayrıca, Plazma işlemi, aramid liflerinin yüzey enerjisini ve pürüzlülüğünü artırarak, lif-matris arayüzeyinde daha güçlü mekanik ve kimyasal bağların oluşmasını sağlar. Plazma işleminin, p-aramid/fenolik kompozitlerin performansını artırabildiği bulunmuştur. Plazma işlemi, kumaşın yüzeyinde oksijen ve azot grupları oluşturur ve bu yüzey pürüzlülüğünü artırır. Böylelikle, p-aramid lif ile fenolik reçine arasındaki bağ güçlenmekte ve kompozitin genel özellikleri iyileştirilmektedir [53]. Plazma işleminin, p-aramid/fenolik kompozitlerin tribolojik performansını artırabildiği bulunmuştur. Plazma işlemi, kumaşın yüzeyinde oksijen ve azot grupları oluşturur ve bu yüzey pürüzlülüğünü artırır.

Böylelikle, p-aramid lif ile fenolik reçine arasındaki bağı güçlendirerek kompozitin tribolojik özelliklerini iyileştirdiği rapor edilmiştir [54]. Plazma ile işlem görmüş lifli kompozitlerin kırılma yüzeyleri, liflerin fibrillasyonu ve matris çatlaması incelendiğinde daha güçlü arayüzey bağlanması gösterdiği ve artan lif/matris arayüzey bağ dayanımı sayesinde bozunma dayanımlarının iyileştiği sonucuna varılmıştır [55].

İplik çekme kuvvetini artırmanın bir diğer yöntemi, önemli miktarda darbe enerjisi absorbe eden ve liflerin darbe performansını iyileştiren, nano süspansiyon özelliği taşıyan kayma kalınlaşma sıvısı (STF) kullanmaktır. Silisyum karbür (SiC) ve karbon nanotüpler (CNTs) gibi katkı maddelerini içeren çok fazlı STF'ler, tek fazlı STF'lere göre daha büyük kayma kalınlaşma etkileri sağlar. Nanopartiküller, STF-kumaş etkileşimlerini düzenleyerek iplikler arası sürtünmeyi artırır [56,57]. Başka bir çalışmada, silika nanopartiküller, polietilen glikol (PEG) çözeltisinde dağıtılmış ve metanol ile seyreltilerek p-aramid kumaşa etkili bir şekilde nüfus ettirilmesi sağlanmıştır. Deneysel sonuçlar, STF'nin hacim ve yüzey yoğunluğu açısından enerji sönümlemesini önemli ölçüde artırdığını göstermiştir [58]. İplik çekme testi ile STF kaplı kumaşın yüksek iplikler arası sürtünmesinin, çevresindeki ipliklerin darbe enerjisi yayılımına katılımını artırdığını ve kesme esaslı yüklemelerde örneğin bıçak darbelerinde p-aramid kumaşın direncini artırdığı ifade edilmiştir [59-61]. Ayrıca, farklı polimerik hibrit kaplamalar ve nanoparçacıklar kumaş yüzeylerine uygulanmaktadır. Örneğin, kumaşa uygulanan ısı ve basma kuvvetleri altında kaplamaların, iplik çekme özellikleri üzerinde önemli bir etki yaparak, ipliklerin kesişim bölgelerindeki etkileşimleri artırdığını ve böylece çekme enerjisinin arttığı ifade edilmiştir [62]. Yüksek yoğunluklu poliüretan reçine ile emdirilmiş kumaş, iplik katılımının artması, iplik kaymasının azalması ve dolayısıyla çıkarılma için daha yüksek enerji gereksinimi nedeniyle daha yüksek çekme performansı göstermiştir [63]. Hem doğal hem de sentetik polimerler ile kayma kalınlaşma sıvıları (STF'ler), kumaşların darbe direncini, öncelikle sürtünme yoluyla artırır. Ancak, termoplastik matrisler kumaşın esnekliğini iplik hareketini sınırladığı için olumsuz etkilediği sonucuna varılmıştır [64].

Bor karbür (B₄C) kompozitlerde, elektriksel iletkenliği artırmak için %1-4 (hacimsel) arası grafen nanoplateletler (GNP'ler) eklenerek üretilmişlerdir. Ana toklaşma mekanizmaları, GNP'lerin çekilmesi esaslı gerilme yığılmaları, çatlak köprüleme ve

çatlak saptırma süreçlerini içermektedir [65]. Ayrıca, polietilen glikol (PEG) ve mikro bor karbür karışımının, kumaşta hem yüzey hem de iplik-iplik sürtünme esaslı dayanımları artırdığı gösterilmiştir [66]. Buna ek olarak, çinko oksit (ZnO) nanotel ve silika (SiO₂) kaplamalarının, p-aramid dokuma kumaşlarında gerilme enerjisini, iplikler arası sürtünmeyi ve yüksek gerilme hızı enerjisinin sönmelenmesini artırdığı ifade edilmiştir. Silika kaplama, bu açıdan çinko oksit nanotel kaplamasına kıyasla üstün bir iyileşme gösterdiği rapor edilmiştir [67]. Öte yandan, aramid nanoliflerinde [68,69] ve aramid kaplı karbon nanotüplerde (CNTs) [70,71] yapılan ilerlemeler, rijit kompozit plaka yapılarında kullanılan aramid liflerinin özelliklerini iyileştirmek amacıyla gerçekleştirildiği anlaşılmıştır. Son yıllarda, aramid liflerinin yüzeyini fonksiyonlamak amacı ile silan ajanlarının kullanımı ile lif/matris bölgelerinde arayüzey bağlayıcıları iyileştirilmiştir [72]. Silika parçacıklarının fonksiyonelleştirilmesi, metil trimetoksisilan (MTMS) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. MTMS ile değiştirilmiş silika bazlı STF ile işlem gören p-aramid kumaşı, artan iplik çekme direnci ve darbe enerjisi dağılımı göstermiştir. Bu iyileşme, hidrofilik p-aramid kumaşı ile yüzey mühendisliği yapılmış hidrofobik silika parçacıkları arasındaki değiştirilmiş arayüzey etkileşimleri sonucunda gerçekleşmiştir [73].

İki boyutlu (2D) kumaş, sınır koşulları altında soft balistik yapılardaki uygulamalar da aşırı şekil değişimi üzerindeki krimp kaynaklı deformasyonun etkisini açıklamak amacıyla, bir boyutlu viskoelastik bileşenlerle bağlanmış düğüm kütlelerinden oluşan bir ızgara olarak benzetişimler yapılmıştır [74]. Kumaşın kayma deformasyonu ve iplik çekilmesi ile ilgili enerji sönmelenmesi, dijital görüntü korelasyonu (DIC) tekniğine dayanan bir doğrusal model önerilerek incelenmiştir [75]. Ayrıca, yüksek performanslı kumaş, LS-DYNA kullanılarak modellenmiş ve balistik performans üzerindeki sürtünme ve malzeme özelliklerinin etkileri irdelenmiştir. Analiz, balistik etkinliğin, sürtünme kuvvetleri, elastik modül ve ipliklerin çekme dayanımından etkilendiğini göstermiştir [76]. Öte yandan, 3D hesaplama modeli, iplikler arası sürtünme etkileşimlerinin çekme kuvveti üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermiştir [77].

1.3. Lif ve kumaş sürtünmesi

Yüksek dayanımlı ve yüksek modüllü ipliklerin sürtünme özellikleri, filament dokusuna bağlı olarak izotropik olmayan bir davranış sergiler. Kumaş ve filament yüzey morfolojisi

ve iplik yönü sürtünme özelliklerini etkilediği anlaşılmıştır [78]. İplik sürtünme katsayısını nicelleştirmek için genellikle kapstan ve bükümlü iplik yöntemleri kullanılmaktadır [79-81]. Kumaştaki iplik çekilmesi dikkate alındığında, kesişme (interlacement) noktalarındaki sürtünme etkileşimleri, tüm kumaş yapısının bütünlüğü ve özellikle düşük gerilme hızı yüklemesi sırasında kesişme noktalarının direnci nedeniyle önemlidir [82]. Yapılan bir araştırmada, aramid ipliklerinin sürtünme katsayısının ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE) ipliklerin sürtünme katsayısından daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur [83]. Çalışma ayrıca, komşu filamentler ve ipliklerin kesişme bölgelerindeki arayüzey sürtünme enerjisinin dağılmasının, iplik ve kumaş sertliğini belirleyen önemli bir faktör olduğunu da göstermiştir [84]. İplikler arasındaki sürtünmenin, özellikle iplik uzunluğu boyunca, ipliklerin mekanik davranışını önemli ölçüde etkilediği ileri sürülmüştür. İpliğin kesit boyunca statik sürtünme katsayısı, uzunluğu boyunca sürtünme katsayısına göre belirgin şekilde daha düşük olduğu bulunmuştur [85]. Başka bir çalışma, mermi-kumaş sürtünmesinin, merminin kumaşla temas bölgesindeki maksimum gerilimi çevreye yeniden dağıtarak iplik kopmasını geciktirdiğini göstermiştir. Bu gecikme, darbenin sonraki aşamalarında kumaşın enerji sönmlemesini önemli ölçüde artırmaktadır. İplik-iplik sürtünmesi, kumaşın krimpın uzaklaştırılmasına karşı direnç gösterdiği ve darbe sürecinde kumaşın erken bozunmasına yol açabileceği ileri sürülmüştür [86].

1.4. Nanobalistik (yüksek hız)

Dayanıklı, yüksek performanslı liflerin geliştirilmesi, özellikle balistik uygulamalar için kumaş ve esnek kompozit laminatların geliştirilmesine yol açmıştır. Bunlar arasında türbin kanadı, gövde koruma ve vücut zırhı yer almaktadır. Bu balistik tekstillerin performansı için önemli olan malzeme özelliklerini ve performanslarının belirlenmesi amacıyla birçok çalışma yapılmıştır. Balistik performansı etkileyen faktörler özellikle, iplik malzeme özellikleri, kumaş yapısı, mermi geometrisi ve hızı, sınır koşulları, çoklu katmanlar ve sürtünme olarak ele alınmıştır [21].

Soft balistik yelekler ve sert plakalar, askeri personel ve kolluk kuvvetleri tarafından kullanılmaktadır. Soft yelekler genellikle yüksek mukavemetli/modüllü liflerden yapılmış dokuma kumaşlardan oluşurken, sert plakalar çoğunlukla seramikten yapılmaktadır. Birçok araştırmacı, ultra hafif ve yüksek koruma seviyesine sahip zırhlar

geliştirmek amacıyla seramikler ve polimer kompozit malzemeler üzerinde çalışmaların halihazırda yürütülmekte olduğu saptanmıştır [87-89].

Yüksek mukavemetli/modüllü polimer lifler, örneğin polietilen ve para-aramid, soft ve rijid balistik için genellikle 2D dokuma kumaşlar kullanılır. Birden fazla 2D dokuma kumaş, çeşitli kalınlıklarda yapılar tasarlamak amacıyla katmanlanabilir. Alternatif olarak, bu katmanlı yapılar, özellikle arka yüzey deformasyonunu azaltarak balistik ve kesme (bıçaklanma) direncini artırmak için bir veya daha fazla yönde dikişle birleştirilir [90,91]. 2D dokuma kumaşlar, yapının kırılma dayanımını artırmak için elastomerlerle kaplanır [92-94]. Öte yandan, para-aramid kumaşın, etilen glikol içinde dağılmış nanosilika parçacıklarıyla yapılmış sürtünme kalınlaştırıcı sıvı ile emprenye edildiğinde, balistik/darbe penetrasyonuna karşı daha esnek ve dirençli hale geldiği öne sürülmüştür [95]. Mermi/darbe/yaralama türündeki tehditlere karşı koruma sağlamak için, 3D ortogonal dokuma (dik dokuma), 3D açılı kilitli dokuma, 3D tamamen/ kısmen kesişmeli dokuma kumaşlar ve çok eksenli 3D dokuma veya örme ön şekiller kullanılarak yapılmış soft yelekler kullanılmıştır [96,97]. Tek katmanlı ve çok katmanlı dik (ortogonal) ve dokunmuş (interlaced) yapılar kullanılarak, hibrit 2D/3D kumaş tabanlı yelekler tasarlanmaktadır [98].

Soft yeleklerin balistik/darbe performansını etkileyen faktörler arasında lif/iplik özellikleri, kumaş yapısı, yüzey işlemleri, katman sayısı ve katman sırası, mermi/bıçak geometrisi ve hızları, kumaş-mermi ve iplik-iplik sürtünmeleri ve uzak alan sınır koşulları yer almaktadır [21]. Yapılan bir çalışmada, yüksek modüllü ipliklerle dokunan sıkı örgülü kumaşların, daha gevşek dokuma yapılara kıyasla darbe enerjisini daha etkin dağıttığı ve kumaşların katmanlarındaki iplik-iplik sürtünmesinin artırılmasıyla yumuşak zırhın toplam penetrasyon direncinin iyileştirildiği rapor edilmiştir [99]. Makro ölçekte, kumaş bozunması, düzlem içi (in-plane) ve düzlem dışı (out-of-plane) kumaşın eğilmesi sonucu, arka yüzey deformasyonuna yol açar. Tamamı ile kayma deformasyonu olarak gerçekleşen yerel kayma ve yerel şekil değişimleri, kumaş yapısında iplik-iplik sürtünmesi [100-102] olarak gözönüne alınmaktadır. Mezo seviyede bozunma, iplik krimpinin giderilmesi/çekilmesi/tutunma-kayma, yerel iplikler arası sürtünme ve kayma, kumaş katmanı kayması, yerel kısmi/tam iplik kopması ve darbe yükünün etkilerinin uzağındaki iplik bozunmasını [103] içermektedir.

Delme/darbe sırasında mikro seviyede bozunma, filament fibrilasyonu/kayması ve birden fazla filamentin kopması olarak meydana gelir. Soft yelekte kumaşın sertliği, giyenin manevra kabiliyeti ve konforunu etkilediği için önemli bir parametredir. Kumaşın eğilme davranışı, lif/iplik özelliklerine, kumaş yapısına, katman sayısına, kumaş bitimine ve kumaşın eğilme rijitliğini etkileyen nano işlem ve dikiş gibi ek süreçlere de bağlıdır [104-107]. Yeni geliştirilen test yöntemleri, balistik yeleklerin hareket kısıtlaması, vücuda uyum derecesi ve konfor parametrelerini gerçek vücut hareketlerini simüle ederek değerlendirmekte; böylelikle, kullanıcıların manevra kabiliyetini etkileyen kumaş esnekliği ve ergonomik uyum gibi faktörlerin nicel olarak ölçülmesine imkân sağlamaktadır [108]. Balistik/darbe direnci özellikleri, yüksek balistik sınır değeri olan esnek ve hafif balistik yapılar elde etmek amacıyla özel kumaş mimarilerinin geliştirilmesiyle de iyileştirilmiştir [1,21,23-25]. 2D dikişli dokuma kompozitin, patlayıcılardan kaynaklanan delaminasyon hasarını azaltmada etkili olduğu ancak balistik mermi tarafından oluşan hasarı azaltmada ihmal edilebilir bir etkisi olduğu ifade edilmiştir. Hasar direnci, dikişin, katarası açılma/çatlak (mode-I) dayanımını artırması nedeniyle iyileştirdiği, patlayıcı ile hasar gördüğünde, 2D dokuma kompozitinin özellik kaybı, 2D dikişli dokuma kompozitlerden daha büyük olduğu sonucuna varılmıştır [109-111]. Bir başka çalışmada, yapılan analizler sonucunda, özellikle küt uçlu mermilere karşı, kalınlık yönündeki şekil değişiminin daha önemli bir enerji sönmeme mekanizması olduğunu ve bunun da daha kalın hedeflerin balistik açıdan daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır [112-114].

Hibritlemenin, soft koruyucu balistiklerin performansını artıracak ve ince (550 dtex) para-aramid ipliklerden üretilen kumaşların artan oranda örtme faktörüne sahip olduğu ve arka katmanlar için en etkili olacağı sonucuna varılmıştır. Sistemin ön katmanları, daha yüksek gerilim yüklemelerine tabi tutulduğunda, darbe noktasından gerilme dağılımını en üst düzeye çıkaran düşük örtme faktörüne sahip kumaşlardan elde edildiği açıklanmıştır [2]. Yapılan başka bir çalışmada, özellikle küt uçlu mermilerle etkileşimde, hedefin kalınlık yönünde meydana gelen yerel ezilme ve plastik şekil değişimi mekanizmalarının enerji absorpsiyonunda baskın rol oynadığı, bu nedenle hedef kalınlığının artmasının merminin kinetik enerjisinin daha geniş bir hacimde sönmelenmesini sağlayarak balistik dayanımı artırdığı rapor edilmiştir [115]. Lif esaslı soft ve sert koruyucu malzemelerin özellikleri, nanomalzemeler içeren yüksek

mukavemetli/yüksek modüllü lifler ve tok matrisler kullanılarak iyileştirilebileceği önerilmiştir [116].

Nanoteknolojinin gelişmesiyle birlikte, araştırmacılar balistik yelek, zırhlar veya kaskların koruma performansını geliştirmeye çalışmaktadır. Koruyuculuk uygulamaları için göz önüne alınan nanomalzemeler, en az bir boyutu 100 nanometreden küçük olan malzemelerdir [117,118,19]. Son yıllarda yapılan çalışmalar, polimer matris içerisine düşük ağırlıklı inorganik nanoparçacıkların (örneğin SiC, Al₂O₃, BN) homojen şekilde dağılmasıyla, balistik kumaşların darbe enerjisini daha geniş bir alana yayarak çatlak ilerlemesini yavaşlattığını ve böylece kumaşların penetrasyon dayanımını %18–30 oranında artırabildiğini göstermiştir [119]. Nanoparçacık katkılı polimer kompozitlerde, çatlak yön değiştirme ve pinleme etkileri, balistik darbe altında enerji emilimini artırarak dayanımı iyileştirmektedir [120]. Karbon nanotüplerin balistik zırh sistemlerine entegrasyonu, yüksek çekme mukavemeti ve esnek yapıları sayesinde koruma seviyesini artırmakta ve giyilebilirlik konforunu korumaktadır [121]. Ekipman koruyuculukta da nanomalzemeler büyük önem arz etmektedir, tek ve çok katmanlı hibrit kompozit yapıların zırh arkasındaki yüzey parçalanması (spall davranışı), şekillendirilmiş yük kullanılarak incelenmiş ve çok katmanlı yapıların yüzey parçalanması (back face spall) oluşumunu azaltmada daha etkili olduğu bulunmuştur [122]. Amerika Birleşik Devleti (ABD) Donanması ve Lockheed Martin tarafından yürütülen bir araştırma, F-35 gibi uçaklarda kullanılan entegre yakıt tankları için toksik olmayan, kromat içermeyen korozyon önleyici kaplamaların geliştirilmesine odaklanmıştır. Bu çalışmada, fonksiyonelleştirilmiş nanoparçacıklar kullanılarak geliştirilen kaplamalar, geleneksel kromat bazlı kaplamalarla karşılaştırıldığında, benzer veya daha iyi performans göstermiştir. Bu kaplamalar, özellikle Al2024 ve Al7075 gibi uçaklarda yaygın olarak kullanılan alüminyum alaşımlarında etkili olmuştur [123]. Öte yandan, şeffaf balistik koruyucu malzemeler arasında camlar, cam-seramikler, tek ve çok kristalli seramikler, alümina, spinel veya bor karbür ve polimer kompozitler gösterilmiştir [12]. Günümüzde, mevcut yüksek performanslı kumaş yapıların dinamik darbe performansını artırmak amacıyla STFs, modifiye STFs, termoplastik polimer kaplama ve nanoyapıların büyütülmesi gibi yüzey işlemleri ile yapılmıştır [16,17]. Balistik performans açısından, katmanarası hibritleme teknikleri olarak hidrotermal büyüme ve nanoparçacık kaplama (ZnO, CNTs, grafen, nano silika, nano kil, biyomimetik nanoparçacıklar vb.) üzerine

çalışmaların devam ettiği tespit edilmiştir [8]. Ayrıca, tekstil üzerine yapılan nano kaplamalar gibi katmanarası hibritleme teknikleri, çok fonksiyonlu ve yüksek performanslı tekstil tabanlı kişisel koruyucu panellerin geliştirilmesi için istenilen özelliklerin aktarılmasına yardımcı olmaktadır.

Aramid lifinin hıza duyarlı davranışı, zener viskoelastik modeliyle modellenmiş ve modelin parametreleri, deneysel verilerden hız duyarlı modülün en küçük kareler yöntemiyle uyarlanarak elde edilmiştir [124]. Aramid (Twaron®, Teijin) örneklerinin, düşük gerilme hızlarında çözgü yönünde daha uzun fibrillerin ayrılmasıyla bozunduğu, yüksek gerilme hızlarında ise daha kısa ve daha az fibriller bozunma gözlendiği ileri sürülmüştür [124]. Parametrik model, üretilen verilerin altı boyutlu doğrusal olmayan regresyon analizine dayanmaktadır ve bu model, kullanıcı tarafından tanımlanan alan yoğunluğu ile bu kişisel koruma sistemlerinin performansını tahmin edebilmektedir. Bu açıdan, $U^* = \sigma \varepsilon \frac{\sqrt{E/\rho}}{2\rho}$ bağıntısı önerilmiştir ki burda U^* boyutsuz enerji indeksini, σ çekme gerilmesini, ρ yoğunluğu, ε birim uzamayı ve E çekme modülüdür. Model, kişisel koruma sisteminin darbeye karşı aldığı enerjiyi, sistemin balistik sınırının çok üzerinde hızlarda kinetik enerji transferi yoluyla enerji emiliminin baskın mekanizması olduğu noktada, gerilme ve kinetik enerjiye ayırmaktadır [125,126].

1.5. Nanodüşürme (düşük hızlı darbe)

Düşük hızda darbe, hızların 100 m/s'den az olduğu darbe olarak tanımlanmıştır. Düşük hızda darbe sırasında, etkilenen yapının darbe ile tepki verebilmesi için temas süresi uzun olmaktadır [127]. Buna karşılık, yüksek hızda darbe, hızların 100 m/s'den fazla olduğu darbe olarak tanımlanarak, etkilenen yapının tepki verme zamanı çok kısa olup yapı tepki verme fırsatı bulamamaktadır [127,128]. Düşük hızda darbe testi, özellikle tekstil bazlı kompozit yapıların havacılık endüstrilerinde, düşen aletler, dolu, pist kalıntıları, kuş çarpması (bird strike) gibi düşük hızda darbe risk kaynaklarıyla karşılaşılan durumlarda önemli olmaktadır, öyleki yapıda gerçekleşen mikro bozunmalar süreç içerisinde sıradışı felaketlere yol açma potansiyeline sahiptir. İki boyutlu (2D) dokuma kumaşa iplik kesişmelerinin, balistik darbe noktasından uzun dalga yayılmasını engellediği bulunmuştur [129,130]. Kompozitler için çok katmanlı ve çok yönlü dikişli E-cam kumaş yapıların düşük hızda darbe davranışı incelenmiştir. Yapının darbeye karşı gerilme ve

eğilme özellikleri, katmanlar arasında gerilmenin düzgün bir şekilde dağıtılmasından dolayı dikiş ile iyileştirildiği öne sürülmüştür [131]. Düşük hızda darbeye karşı 2D dikişli dokuma kompozitlerin açılma (delaminasyon, mode-I) hasarının büyüklüğü, geleneksel dokuma kumaş kompozitlerden bir derece daha büyük olmuştur. Bunun dikişleme işleminden kaynaklanan lif hasarı, reçinenin homojen dağılmaması, iplik krimp ve kırılma ile ilgili olduğu iddia edilmiştir [132,133]. 2D dikişli dokuma E-cam/epoksi kompozitlerin düzlem içi gerilme ve kalınlık yönündeki darbe üzerine dikişin etkileri araştırılmıştır. 2D dikişli dokuma kompozitler, katarası açılma eşiğine yakın bir enerji seviyesinde tekrarlanan darbe yüklemesi altında delaminasyon çatlak yayılmasını engellemiştir [134]. Üç boyutlu (3D) dikişli kompozitlerin hasar başlatma kuvveti, dikiş etrafındaki düzensiz reçine dağılımı nedeniyle, geleneksel 2D dokuma kompozitlerden daha düşüktür. Yoğun dikişli kompozit, darbe yüklemesi altında daha fazla dikiş kaynaklı reçine bozunmasına sahip olmuştur [135-138]. 2D dikişli dokuma kompozitlerde hasar yayılımının silindirik, 2D geleneksel dokuma kompozitlerde ise konik olduğu bildirilmiştir [139].

Diğer bir çalışma, 3D dik dokuma E-cam/vinil ester kompozitin düşük hızda darbeye karşı en büyük direncine sahip olduğunu ve 2D bezayağı dokuma E-cam/vinil ester ve 2D iki eksenli örgü E-cam/vinil ester kompozitlerden daha fazla toplam enerji dağıttığını göstermiştir. Bunun yapıda z-lif kısmının enerji sönmeme mekanizmasıyla ilgili olduğu ileri sürülmüştür. Tüm malzemeler için tipik bozunma modları arasında matris çatlağı, delaminasyon ve lif kırılması yer almaktadır [140]. Ayrıca, yoğun dikiş aralığına sahip kompozitlerin sönmelenen enerjisi, gevşek dikiş aralığına sahip kompozitlere göre yüksek olup, daha az hasar toleransı gösterdiği tespit edilmiştir [141-143].

Nano katkılı E-cam/polyvinil ester epoksi kompozitler üzerine yapılan çalışmada, plakanın ön yüzeyine yakın yerleştirilen çok duvarlı karbon nanotüp 100 mikrometre kalınlığında efektif olduğu sonucuna varılmıştır [144]. Başka bir nano kompozit çalışmada, S-cam/epoksi silikat nano kil, sadece daha iyi rijitlik sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda darbe direncini ve kırılma dayanımını artırarak, bozunma mekanizmasını katmanlararası (interlaminar)'dan katmaniçi (intralaminar)'a değiştirmiştir [145]. Son zamanlarda yapılan çalışmalar, malzeme türü (silikat veya karbon veya metal), malzeme parçacık boyutu (nano veya mikro), malzeme miktarı (ağırlık, %), dikiş yoğunluğu (adım/cm) ve dikiş tipi (el veya makine) gibi faktörlerin, kompozitlerin hasar alanlarını

etkilediğini göstermiştir. Nano ve mikro katkılı E-cam/polyester dokuma kompozitlerin, ön yüzeyde küçük hasar alanlarına sahipken, arka yüzeyde büyük hasar alanlarına sahip olduğu rapor edilmiştir [146,147].

1.6. Darbe sonrası basma (CALVI)

Darbeden sonra basma (CAI) testi, kompozit malzemelerin darbe sonrası basma dayanımının önemli ölçüde azaldığı gerçeğine dayanarak, kompozit malzemelerin hasar toleransını belirlemek için geliştirilmiştir. CAI, özellikle havacılık uygulamaları için kompozit yapısal parçalar için bir tasarım parametresidir. Birçok CAI test yöntemi, örneğin NASA, SACMA, AIRBUS, BAE Systems ve BOEING gibi çeşitli araştırma merkezleri ve özel şirketler tarafından geliştirilmiştir ve bunlar havacılık/uzay ve endüstriyel üreticiler tarafından kullanılmaktadır [148-153]. Dikiş tekniğinin, geleneksel 2D dokuma kompozitlerin dayanım özelliklerini, ayrıca enerji sönümleme kapasitesini iyileştirmesi, dikiş ipliklerinin katmanlar arasında daha düzgün bir yük dağılımı sağlamasına bağlanmıştır [131]. Karbon ve aramid fiber takviyeli hibrit kompozitlerin düşük hızlı darbe sonrası basma (CALVI) davranışları, aramid tabakalarının yerleşim sırasına bağlı olarak önemli ölçüde değişmektedir. Aramid tabakalarının hem darbe alanı hem de karşı yüzeyde bulunması, genel darbe davranışını iyileştirmekte ve alt kritik hasar morfolojisi sağlamaktadır [154]. Richardson ve Wisheart [155], hasar modlarının esasen reçine çatlaması, katmanların açılması ve filamentlerin kırılması olduğunu belirtmişlerdir.

Dikişin, tekrarlanan darbe yüklemesi altında delaminasyon çatlaklarının yayılmasını baskıladığı ve daha yüksek lineer yoğunluğa sahip dikiş ipliklerinin daha iyi delaminasyon direnci sağladığı bildirilmiştir [134]. CAI yüklemesi altında kompozitteki katarası açılma bölgesi, lif yönüne ve darbe noktasının mesafesine bağlıdır. Hibrit karbon/aramid dokuma kompozitlerin düşük hızlı darbe sonrasında gösterdiği basma dayanımının, aramid tabakalarının yerleşim sırasına bağlı olarak değiştiği ve uygun tabaka düzenlemeleriyle darbe sonrası mekanik performansın önemli ölçüde artırılabilceği bulunmuştur [156]. Kalınlık yönündeki kat açılması, darbe düzleminde eğilmeye neden olduğu ve kompozitin dayanımını azalttığı bildirilmiştir [157]. Hasar alanı enerji seviyesine bağlı olup, katman sıralamasının etkisi ihmal edilebilir seviyede olduğu, CAI testinden sonra hasar yayılmasının, burkulma (kinking) hasar alanı nedeniyle

gerçekleştiği bildirilmiştir [158-159]. Cam-lif/epoksi kompozitindeki düzlemsel hasarın, kalınlık yönündeki darbe hasarına sahip örneklerle kıyasla düşük olduğu ileri sürülmüştür [160]. CAI yükü altındaki kompozit yapı, mikrofiber burkulması ve kırılma göstermiştir. Kırılgan reçineye sahip yapının, katmanlar arasındaki delaminasyonun yayılmasından değil, kırılma bantları nedeniyle bozulduğu iddia edilmiştir [161]. Başka bir çalışma, matris ve lif kırılmaların yapının arka yüzeyinde başladığını ve daha sonra hem yanlamasına hem de kalınlık boyunca kesme modunda yayılarak yapısal bozunmaya yol açtığı tespit edilmiştir [162].

Basma yükü altında, dokuma kumaş kompozitin bozunması esasen kırılma bandı oluşumu nedeniyle gerçekleşmiştir [163]. Öte yandan, nano parçacıklarla güçlendirilmiş bir kompozit yapı, düşük hızda darbe hasarına karşı direncin arttığını, bunun parçacıklarla reçine arasındaki bağın kopması, çatlak köprüsü oluşturma ve şekil değişimi nedeni ile olduğu ileri sürülmüştür [164]. Z-çubuk eklemeli kompozit yapıların düşük hızda darbe hasar alanı düşük çıkmış olup, CAI dayanımındaki iyileşme ise z-çubuk çekme kuvvetinin bir fonksiyonu olmuştur [165]. Çok yönlü dikişli kompozitlerdeki CAI yükü, etkilenen çökme bölgesine yakın düzlemde hasarlara neden olmuştur. Yapılar büyük hasar alanları göstermiştir, ancak kalınlık düzlemindeki katman delaminasyonu nispeten küçük alanlarla sınırlı kalmıştır. Bu nedenle, çok yönlü dikişleme, kompozitin CAI özelliklerini iyileştirmiştir [166].

1.7. Mekanik özellikler

1.7.1. Çekme

Üç boyutlu (3D) tekstil kompozitlerin, z-lif nedeniyle düşük düzlem özelliklere sahip olduğu, nanoparçacık eklemeli iki boyutlu (2D) kumaş yapısında ise bunların süreksiz yapıları nedeniyle kompozite kalınlık yönünde katkılarının sınırlı olduğu gözlenmiştir. 3D kompozitin gerilme dayanımının, önşekil (preform) formlanması sırasında bazı filament kırılmaları nedeniyle kısmen azaldığı tespit edilmiştir [167]. Diğer yandan, statik çekme dayanımı, krimpiz kumaş (NCF) kompozitlerde düşük çıkması bölgesel lif düzensizliği ve reçine yoğun bölgelere dayandırılmıştır [168]. Dokuma kumaşın çekme özelliklerinin, lif tipi ve dokuma yapısı özelliklerine bağlı olduğu ileri sürülmüştür [169-]

[171]. 2D dokuma kumaşa z-ipliği eklenmesinin, kompozitin düzlemdeki gerilme özelliklerinin düşmesi pahasına kompozitin kırılma dayanımını artırdığı bulunmuştur [172]. Buna karşın, dikişli kompozitlerin düzlemde gerilme ve kayma özellikleri bir miktar azalmış ancak bunların kalınlık yönündeki özelliklerini iyileştirmiştir [173,174]. Yapılan bir çalışmada, aramid kumaş/epoksi kompozitlere grafen nanoplakalar ilavesiyle çekme mukavemetinin önemli derecede arttığını ve bunun, nanoparçacıkların matris içinde lifler arası yük transferini geliştirerek çatlak ilerlemesini geciktirmesine bağlı olduğu rapor etmiştir [175]. Krimpsiz kumaş esaslı kompozitlerin (NCF) kırılma dayanımının, dikiş ilmeklerinin karmaşık heterojen arayüz davranışı nedeniyle, 2D dokuma kompozite kıyasla daha düşük olduğu bildirilmiştir [135,176-178].

Reçinedeki çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNTs) oranı arttığında, çekme dayanımı ve uzamasının arttığı ifade edilmiştir [179]. Buna karşılık, karbon/epoksi kompozitdeki MWCNTs oranı, çekme dayanımını ve modülünü etkilememiştir [180-182]. Bir başka çalışmada, karbon/epoksi kompozitdeki CNT'ler, kompozitin sertliğini ve çekme kopma uzamasını artırmıştır [183]. E-cam/vinil ester kompozitin çekme özellikleri, nanokil eklenmesiyle artmıştır [184,185]. E-cam/polyester nanosilika kompozitlerin çekme dayanımı ve modülü, nanosilika eklenmesi %2,5'ten %7,5'e çıktıkça artmıştır [186]. Ayrıca, dikişli E-cam/polyester nanosilika kompozitlerinin çekme özellikleri, kontrol örneğe göre bir miktar daha yüksek çıktığı rapor edilmiştir [186,187]. Dikişli E-cam/polyester nanosilika kompozitdeki bozunmalar, dikiş ve nanosilika sayesinde küçük alanlarla sınırlı kalmıştır [186,187]. Nanosilika karbür kompozitlerin çekme modülünün, nanoparçacığın kompozit hacmindeki homojenleştirilmesiyle iyileştiği sonucu elde edilmiştir [188]. Öteyandan, nanosilika karbür kompozitin çekme dayanımı, polyester reçinesindeki nanoparçacıkların gerilme yoğunlaşması (stress concentration) nedeniyle nanosilika karbür arttıkça azaldığı görülmüştür [189]. Dikiş ipliği ve çok duvarlı karbon nanotüplerin, tüm dikişli ve dikişli/nano kompozitlerin çekme dayanımını bir miktar artırdığı ifade edilmiştir [190].

1.7.2. Basma

Epoksi/GNP'lerin basma dayanımı ve modülü, grafen nanoplakaların geniş yüzey alanı sayesinde iyileştirilmiş, bu da çatlak sapmalarına neden olarak yeni kırılma alanları ve kırılma yüzeyinin pürüzlülüğü nedeniyle sürtünmeye yol açarak gerçekleşmiştir. Ancak,

GNPs yükleme yüzdeleri arttıkça, basma dayanımı kademeli olarak azaldığı tespit edilmiştir. Bunun nedeni, epoksinin aşırı plastik deformasyona uğraması ve erken kırılmaların neden olduğu eksenel açılmalarıdır. Buna karşın, GNPs eklenmiş epoksi basma kırılma modunda plastik eğilme, burkulma (kinking) ve kırılma büyük eksenel açılmalar gözlenmiştir. Epoksi/GNPs nanokompozitleri, hasar toleranslı bir malzeme olarak davrandığı öne sürülmüştür [191,192]. Farklı miktarlarda GNPs eklenmiş epoksi nanokompozitlerin, dayanıklılık [193-196], güçlendirme [197,198] ve termal özellikler [199] açısından iyileştirildiği gösterilmiştir. Shen vd. [200], %0,5 ağırlıkça grafen levhalarının epoksiye eklenmesinin, oda sıcaklığı ve kriyojenik sıcaklıklarda Young modülünü artırdığını bulmuştur. Yao vd. [201], sadece %0,8 ağırlıkça grafen eklemenin, epoksiye kıyasla çekme dayanımını %37 ve kopma uzamasını %63 oranında artırdığını göstermiştir. Rafiee vd. [202], epoksi reçine matrisine %0,125 ağırlıkça grafen plaka eklenmesiyle, epoksiye göre %45 oranında bir çekme dayanımı artışı gözlenmiştir. Başka bir araştırma, silan fonksiyonelleştirilmiş grafen oksidin epoksi matrisine eklenmesinin, özellikle iki malzeme arasındaki kovalent bağlarla daha güçlü arayüz etkileşimi nedeniyle termo-mekanik özellikleri önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermiştir [203]. Grafen oksit parçacıklarının hekzametildiamin ile fonksiyonelleştirilmesinin, polimer-nanodolgu sınırındaki serbest yüzey enerjisini azalttığı ve yapışmayı iyileştirdiği rapor edilmiştir [204]. Li vd. [205], amino fonksiyonelleştirilmiş grafen oksidin epoksiye eklenmesinin çekme dayanımını artırırken, epoksi-fonksiyonelleştirilmiş grafen oksidin nanokompozitlerde kırılma dayanımını iyileştirdiğini göstermiştir. Schulte vd. [206], epoksi/GNP kompozitlerinin kırılma dayanımını ve kırılma mekanizmasını incelemiştir. Grafen eklenmiş nanokompozitlerdeki toklaşma mekanizmalarından birinin, daha yüksek yüzey pürüzlülüğünden kaynaklanan çatlak sapması olduğunu öne sürmüşlerdir ki bu testere dişli ardıl kayma bozunması olarak kendini göstermiştir.

1.7.3. Eğilme

Kompozitlerin eğilme dayanımı ve modülü, z-ipliği ve çok duvarlı karbon nanotüplerin (MWCNTs) eklenmesiyle, geleneksel kompozitlere kıyasla bir miktar iyileşmiştir. Geleneksel kompozitlerin eğilme bozunması, matris soyulması ve geniş katarası açılmayla gerçekleşirken, z-iplikli ve z-iplik/nano kompozitler, burkulma esaslı şekil değişimi gösterip, görünür bir matris/lif hasarı elde edilmemiştir [207].

Zhang ve arkadaşları, grafen oksit katkısının aramid/epoksi kompozitlerin matris-fiber arayüzeyini güçlendirerek eğilme dayanımını ve yapısal bütünlüğü artırdığını ortaya koymuştur [208]. Kim vd, aramid kumaş/epoksi kompozitlerde katman dizilim sırasının eğilme davranışını önemli ölçüde etkilediğini ve mekanik dayanımda belirleyici bir faktör olduğunu rapor etmiştir [209]. Halim vd, vakum infüzyon yöntemiyle üretilen aramid/epoksi kompozitlerin homojen reçine dağılımı sayesinde eğilme yükleri altında yüksek mekanik performans sergilediğini bildirmiştir [210]. 2D kumaş kompozitlerinin gerilme ve eğilme özellikleri, katmanlar arası stres dağılımı nedeniyle yapının kalınlığı boyunca eklenen liflerle iyileştirilmiştir [131]. Bir çalışmada, dikiş yoğunluğunun artmasıyla kompozitteki çatlak yayılmasının engellendiği gösterilmiştir [135]. Ancak, bir başka deneysel çalışma, z-iplikli E-cam kompozitin eğilme dayanımının stres yoğunlaşması nedeniyle azaldığını göstermiştir [132,211]. E-cam/polyester kompozitin eğilme dayanımı, iplik yönü, kompozit lif hacim oranından etkilenmiştir. Bu yapı, katmanlar arası açılma bozunması göstermiştir [212]. Z-iplik eklemeli kompozitlerde ortaya çıkan homojen olmayan lif hacmi nedeni ile lif şekil değişimi (fiber distorsiyon) modeli önerilmiştir, model üretim süreci sırasında lif düzensizliği nedeni ile ortaya çıkan sorunun önüne geçerek daha isabetli performans tahminlemeleri yapılmıştır [213]. Singh ve arkadaşları, farklı dokuma yapılarının aramid/epoksi laminatların eğilme mukavemeti ve deformasyon davranışı üzerinde belirgin farklılıklar oluşturduğunu göstermiştir [214]. Bilisik ve arkadaşları, çok duvarlı karbon nanotüp katkısının kompozitlerin eğilme davranışını iyileştirerek kırılma ve delaminasyon mekanizmalarını baskıladığını tespit etmiştir [215]. Bir başka çalışmada, liflerin dikişle bağlanması, dikişli kompozitin tokluğunu etkilememiştir [134]. Ancak, dikiş ilmeğinin çevresinde reçine yığılmaları oluşturmuş ve hasar başlatma kuvvetini etkilemiştir [176,216,217]. Wu ve arkadaşları, grafen oksit ilavesiyle aramid fiberlerin epoksi matris içerisindeki ara yüzey aderansının güçlendiğini, bu sayede lif çekip kopması ve ara yüzeyde ayrılma gibi hasar mekanizmalarının baskılandığını, dolayısıyla kompozitlerin eğilme yükleri altında daha yüksek deformasyon direnci ve bütünlük koruması sağladığını rapor etmiştir [218]. 3D çok eksenli kompozitin eğilme dayanımı ve modülünün, açısallı lifler nedeniyle 3D kompozite kıyasla bir miktar düşük çıktığı ileri sürülmüştür [32,23,219].

Ayrıca, E-cam kompozitin katmanlar arası özellikleri, eklenmiş nanotüpler nedeniyle artmıştır [220]. Karboksil fonksiyonlu MWCNT(%0,1–0,4)/epoksi nanokompozit

üretilmiş ve eğilme özelliklerinin kontrol epoksi kompozite kıyasla iyileştiği gösterilmiştir [221]. Fonksiyonel kompozitin, geleneksel lamina kompozitlere kıyasla iyileştirilmiş eğilme özelliklerine sahip olduğu öne sürülmüştür. Bunun nedeni, amin kaplanmış nanoparçacıklar ile reçine arasındaki daha iyi arayüz, bu da yük transfer mekanizmalarını güçlendirmiştir. Ancak, nano topaklanmanın varlığı, yük taşıma mekanizmasını olumsuz yönde etkilemiştir [222].

1.7.4. Katarası kayma dayanımı

Katmanlar arası kayma dayanımı farklı test yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Bunlar, Iosipescu kayma testi, çift çentikli kayma testi (double notch shear), basma esaslı kayma testi ve kısa kiriş kayma testi (shor beam) yöntemleridir. Kısa kiriş testi yöntemi, katmanlar arası kayma dayanımını belirlemek için basitliği nedeni ile sıklıkla kullanılmaktadır. Burada örnek geometrisi, lif ve matris özellikleri ile önşekil tasarımı, yapı boyunca gerilim dağılımını etkilemiştir [223]. Üç nokta eğilme testinden elde edilen katmanlar arası dayanımların, minimum değerleri temsil ettiği bildirilmiştir. Bu, malzemenin kısa sürede taranması için pratik yöntemlerdir [224,225]. Diğer taraftan, kısa kiriş testi ile 3-nokta eğilme yüklemesinin, kompozitin katmanlar arası kayma dayanımını bulmak için uygun olduğu belirtilmiştir. Kayma gerilmesi, destek açıklığı ve kalınlık oranına bağlı olup kırılma modu çoğunlukla katmanlar arası matris kırılmalarıdır [226]. Bir çalışmada, karbon nanotüpün homojen dağılımı ve nanotüplerin kompozit katmanlarındaki köprüleme etkisi (bridging) nedeniyle kayma dayanımının %15 arttığı belirtilmiştir [227]. Bilisik ve Yolacan [228], E-cam/nano silika kompozitlerde katmanlar arası kayma dayanımının, nano silika miktarının artmasıyla arttığını göstermiştir.

Katarası açılma (Mode-I delamination) geleneksel lamina kompozitler için temel bir bozunma modudur. Ancak, kalınlık boyunca z-lif takviyesi ve nanotüp eklenmesi kompozitlerin katmanlar arası dayanımını bir miktar iyileştirerek katarası açılma bozunmasının önüne geçilmiştir. Örneğin, dikiş ipliğinin temel yapıya kalınlık yönünde eklenmesi, kalınlık boyunca hasarın önüne geçerken, düzlemdeki özellikleri de (çekme ve eğme dayanımı gibi) olumsuz etkilememiştir. Dikiş ve çok duvarlı karbon nanotüplerin 3D aramid/fenolik kompozit üzerindeki etkileri hasar toleransının iyileştirilmesi olarak kendisini göstermiştir [229].

1.8. Literatür sonuçlarının değerlendirilmesi

Literatür incelemelerinden görüleceği üzere nano katkılı para-aramid/epoksi kompozit malzemelerin geliştirilmesi üzerinde az sayıda çalışma tespit edilmiştir. Bu tez kapsamında önerilen çalışma ile genellikle nano-mikro ve makro ölçekte gerçekleştirilerek, literatüre önemli katkılar sağlanmış olacaktır.

1.8.1. Çalışmanın amacı

Projenin amacı nano hegzagonal bor karbür (nh-B₄C) katkı ile para-aramid kumaşların termoset epoksi ile katı nanobalistik yapı haline getirilerek bunların enerji sönümleme özelliklerini karakterize etmektir. Dolayısı ile nanohegzagonal borkarbür parçacıklarının epoksi üzerinden filamentsi para-aramid yapıya olası enerji sönümleme olayına katkısı gerçekleştirilecektir.

Para-aramid esaslı tok lifler ile nh-B₄C katkılı nanobalistik yapılar geliştirilerek balistik ve kırılma tokluğu iyileştirilmiş plakalar bireysel vücut koruma ve yük taşıyan yapısal malzemelerin korunmasında spesifik enerji sönümleme ile koruyuculuk sağlamaları nedeni ile kullanılması amaçlanmıştır. Bu proje kapsamında bu tür yapılar geliştirilecek ve elde edilen veriler analiz edilerek sonuçlar yayın-yayım yolu ile araştırmacılar ve toplumla paylaşılacaktır.

Projenin ana çıktıları nanoparçacık katkısı ile enerji sönümleme, sönümleme sonrası basma dirençleri, statik yük altındaki performansları da göz önüne alınarak hasar toleransı (damage tolerance) iyileştirilmiş para-aramid/epoksi nanobalistik malzeme geliştirmektir. Böylelikle, enerji sönümleme ve bunların bozunma modlarının irdelenmesi, bu proje kapsamında ikinci danışmanın (Abdulkadir Bilişik) geçmişteki balistik konusu ile ilgili uluslararası deneyimleri de göz önüne alınarak araştırılacaktır.

Ayrıca, çok duvarlı karbon nanotüp ve grafen nanoplakalar da kullanılarak nano hegzagonal bor karbür (nh-B₄C) sonuçları ile hem kumaştan iplik çekme (pull-out) ve hem de katı plaka malzemelerin soft ve rijid balistik ve statik yük altındaki performansları irdelenecektir. Bu açıdan doktora çalışması kapsamlı bir şekilde tasarlanıp, veriler üretilerek, belirlenen amaçlara ulaşılacaktır.

1.8.2. Problemin tanımı

Spesifik enerji sönümleme ve statik yük altında yüksek dayanım, hasar toleranslı malzemelerin performanslarının iyileştirilme gereksinimleri uzay ve havacılık endüstrisi, özellikle insansız hava araçları, ve kişisel koruma için artan bir önemde kendini göstermektedir. Bu çalışma kapsamında spesifik enerji sönümleme ve hasar toleransı iyileştirilmiş malzemelerin makro ölçekte geliştirilmesi ile problemin çözümüne katkı sağlanacaktır.

1.8.3. Çözüm önerisi

Bu proje ile önerilen çözüm ise nano katkılı para-aramid/epoksi kompozit malzemelerin laboratuvar koşullarında makro ölçekte prototiplenerek, performanslarının iyileştirilerek geliştirilmesidir.

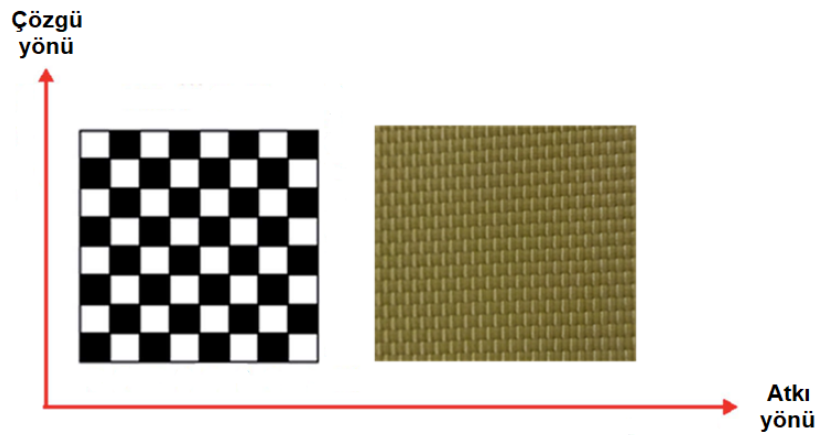
2. BÖLÜM

YÖNTEM VE MATERYAL

2.1. Hammadde

2.1.1. Kumaş

Dokuma kumaş, para-aramid liften ($[-\text{CO}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CO}-\text{NH}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{NH}-]_n$ -, Teijin Inc., Japonya) üretilmiştir. Çözüğü ve atkı ipliklerinin doğrusal yoğunlukları (numarası) 336 tex olarak belirlenmiştir. Para-aramid kumaş, Twaron CT® 747 modelidir. Kumaş, bezayağı dokuma olup, çözüğü ve atkı yoğunlukları 6,25 iplik/cm'dir. Kumaşın birim alan ağırlığı 410 g/m²' dir. Çözüğü ve atkı krimp oranları sırasıyla %5,80 ve %5,90'dır. Kumaş kalınlığı 0,62 mm olup, kumaşa su itici işlem uygulanmıştır. Şekil 2.1'de gerçek kumaş ve şematik görünümü verilmiştir. Tablo 2.1'de ise lif ve kumaş özellikleri sunulmuştur.



Şekil 2.1. Para-aramid bezayağı(1/1) kumaşın sırası ile şematik örgü ve gerçek kumaş görüntüleri.

Tablo 2.1. Nanobalistik, nanokompozit ve nanoçekme (pul-out)'da kullanılan lif [230], kumaş, reçine ve nano malzemelerin [231-235] özellikleri.

Lif ve reçine	Lif çapı (μ)	Lif yoğunluğu (g/cm ³)	Çekme dayanımı (MPa)	Çekme modülü (GPa)	Kopma uzaması (%)	Erime sıcaklığı (°C)		
Para-aramid (Twaron, Teijin, JP)	12	1.45	3200	115	2.9	450		
Epoksi (Hexion, USA)	-	1.14-1.19	70-80	3.2-3.5	5.0-6.5	110-315		
Kumaş	Örgü tipi	Kumaş işlemesi	İplik lineer yoğunluğu (tex)	Kumaş yoğunluğu (per 10 cm)	Kumaş alan ağırlığı (g/m ²)	İplik krimp (%)	Kumaş kalınlığı (mm)	
Twaron CT®747	Bezayağı (1/1)	Su itici	336 (çözgü) 336 (atki)	62.50(çözgü) 62.50 (atki)	410	5.80(çözgü) 5.90 (atki)	0.62	
Nano malzemeler	Parçacık boyutları (çap x uzunluk x kalınlık) (nm x mikron x nm)	Moleküler ağırlık (g/mol)	Yüzey alanı (m ² /g)	Safılık (%)	Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme dayanımı (GPa)	Çekme modülü (TPa)	Erime sıcaklığı (°C)
nh-B4C (Nanografi Inc., TR)	- x - x 40-60	-	55	≥99.5	0.10	-	0.35-0.55	-
MWCNTs (Nanothinx, GR)	15-35 x 10 x 1-2	12.01	>100	≥97	1.74	200	1.00	3550
GNPs (Sigma Aldrich, USA)	25 x - x 6-8	-	120-150	-	2.20	-	-	-

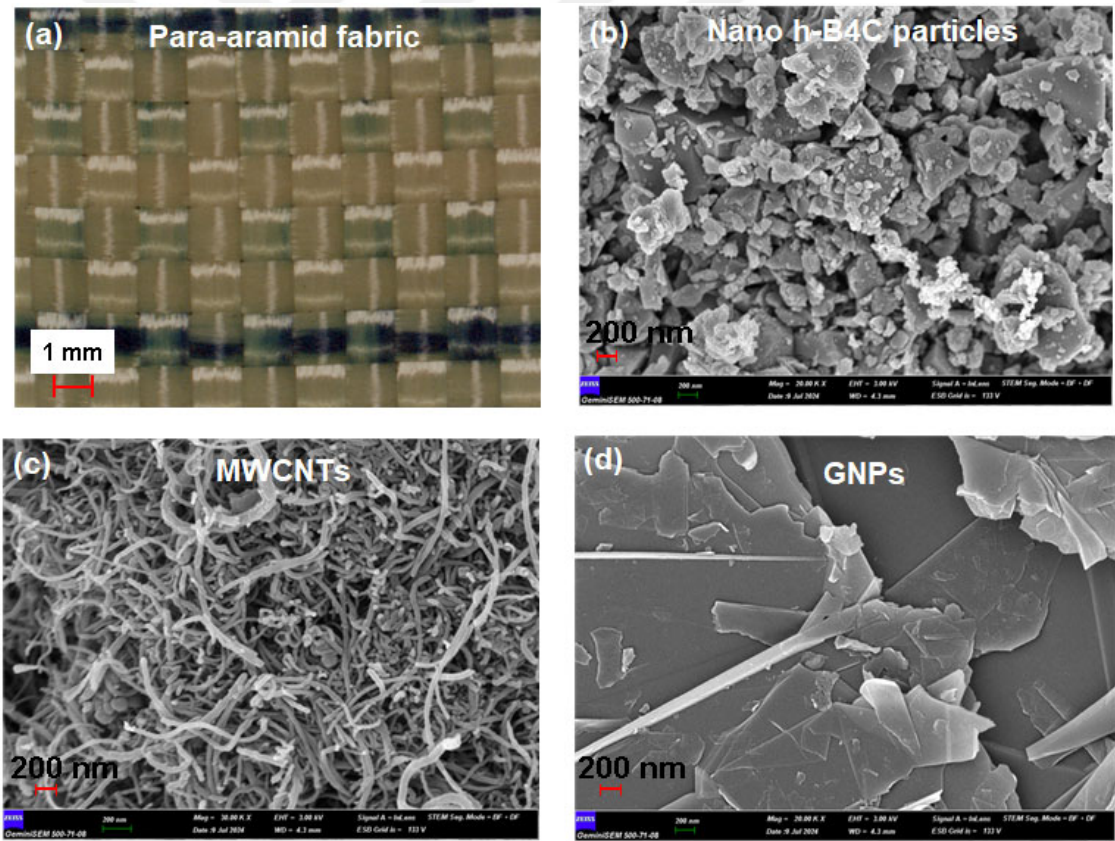
2.1.2. Reçine ve sertleştirici

Kompozit plakaların üretiminde polimer matris olarak Dost Kimya A.Ş. tarafından tedarik edilen MGS L326 epoksi reçine ve MGS H265 sertleştirici kullanılmıştır. Epoksi reçine ve sertleştiricinin genel özellikleri Tablo 2.1 de verilmiştir. MGS L326 bisfenol A/F'nin modifiye edilmiş bir türüdür. Bu tip epoksi reçine yaklaşık -20°C'ye kadar kristalleşme direnci özelliği gösterir. Bu orta kıvamlı bir reçine türüdür ve genellikle yüksek modüllü liflerle uyumluluk gösterir. MGS L326 havacılık uygulamalarında yüksek termo-mekanik özellikleri nedeniyle seçilmiştir. Bu reçineden üretilen kompozit paneller, geliştirilmiş statik ve dinamik yük taşıma kapasitesinin yanı sıra yüksek ısı direnci de gösterirler [236].

2.1.3. Nano malzeme

Nano-hegzagonal bor karbür (nh-B₄C), %99,5 saflıkta, 0,1 g/cm³ yoğunlukta ve 40–60 nm parçacık boyutunda olup, nano katkılı p-aramid kumaş yapısı oluşturmak için kullanılmıştır. Nh-B₄C, Nanografi Corporation'dan (TR) temin edilmiştir [231]. Çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT'ler, Nanothinx S.A., GR), liflerle uyumlulukları, üstün mekanik özellikleri ve ticari erişilebilirlikleri göz önünde bulundurularak seçilmiştir. MWCNT'lerin çapı 15–35 nm, uzunluğu ≥10 μ m, duvar kalınlığı ise 1–2 nm

arasında değişmektedir [232]. Yoğunluğu $1,74 \text{ g/cm}^3$ [233], yüzey alanı $100 \text{ m}^2/\text{g}$ 'nin ve saflığı %97'nin üzerindedir. MWCNT'lerin çekme mukavemeti ve modülü sırasıyla 200 GPa ve 1 TPa'dır. Grafen nanoplateletler (GNP'ler), ticari olarak xGNP®-M-25 adıyla erişilebilir olup, ortalama düzlemsel boyutu $25 \mu\text{m}$, yoğunluğu yaklaşık $2,2 \text{ g/cm}^3$, kalınlığı ise yaklaşık 6–8 nm'dir (yaklaşık 20 grafen katmanı içermektedir) ve özgül yüzey alanı $120\text{--}150 \text{ m}^2/\text{g}$ arasında değişmektedir [234]. Bu nanoplateletler, Rasel Kimya'dan (Sigma Aldrich, XG Sciences, Inc., ABD) temin edilerek bu çalışmada takviye dolgu maddesi olarak kullanılmıştır [237]. Ayrıca, etanol ($\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{OH}$, %96 saflık) Rasel Kimya'dan (United Ethanol Ind., PK) satın alınmıştır. Çalışmada kullanılan nanomalzeme özellikleri Tablo 2.1'de sunulmuştur. Şekil 2.2, bu çalışmada kullanılan p-aramid kumaşın ve nanomalzemelerin görüntülerini göstermektedir.



Şekil 2.2. (a) Para-aramid kumaşın yüzey görüntüsü (optik mikroskop, büyütme: 6,7×), (b) Nano hegzagonal B₄C'nin görüntüsü (FESEM, ölçek: 200 nm; büyütme: 20000×), (c) MWCNT'lerin görüntüsü (FESEM, ölçek: 200 nm; büyütme: 30000×) ve (d) GNP'lerin görüntüsü (FESEM, ölçek: 200 nm; büyütme: 20000×) [238].

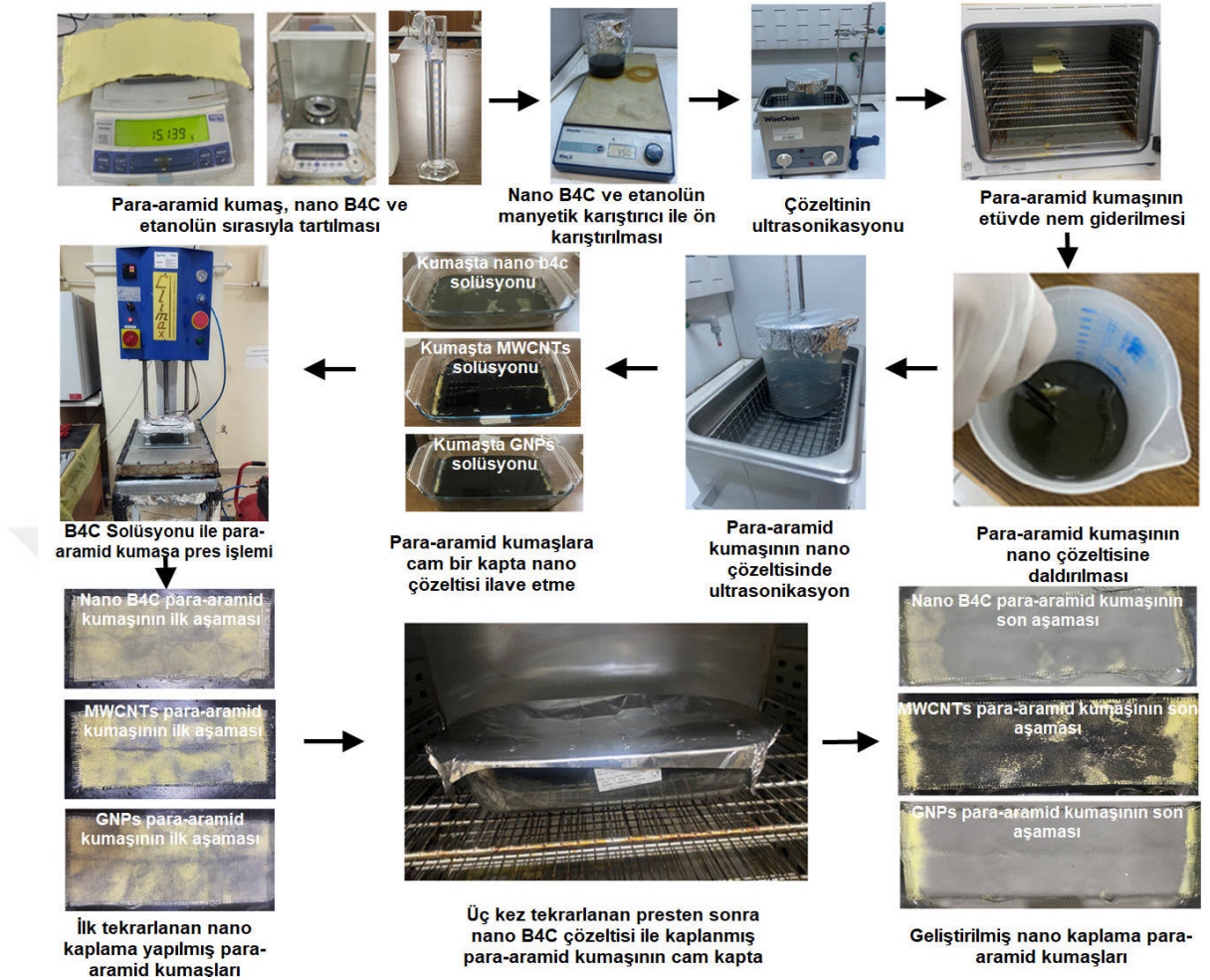
2.2. Soft nano para-aramid yapılar

2.2.1. Nano malzeme kaplamalı p-aramid kumaşlar

Nano parçacık kaplanmış kumaştan iplik çekme (pull-out ya da çekip-çıkarma) numunesi özellikleri bu çalışmada Tablo 2.2'de sunulmuştur. Nano iplik çekme numunesi hazırlama adımları Şekil 2.3'de gösterilmiştir. Ayrıca, tez boyunca kumaştan iplik çekme testi, pull-out ya da çekip-çıkarma olarak adlandırılacaktır.

Tablo 2.2. Kumaştan iplik çekme testi için geliştirilmiş nano kaplamalı p-aramid yapıların özellikleri.

Örnek kodu	Yapılar	Katman sayısı	Nano malzeme ve oranları (%)
KPO	Kaplamasız p-aramid kumaş	1	-
BPO	Nano B ₄ C kaplamalı p-aramid kumaş	1	Nano hegzagonal bor karbür (nh-B ₄ C, %0,3)
MPO	MWCNTs kaplamalı p-aramid kumaş	1	Çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNTs, %0,3)
GPO	GNPs kaplamalı p-aramid kumaş	1	Grafen nano plakalar (GNPs, %0.3)
gCPO	Kimyasal buhar biriktirmeli p-aramid kumaş	1	Çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNTs, %0,32)
PPO	Plazma uygulanmış p-aramid kumaş	1	-
RPO	Kimyasal uzaklaştırılmış p-aramid kumaş	1	-



Şekil 2.3. Bu tez kapsamında geliştirilen ve “ardıl sıkıştırma yöntemi” (iterative compression method) olarak adlandırılan çeşitli nano kaplamalı p-aramid yapılar (Dijital fotoğraf).

Tablo 2.2 ve Şekil 2.3'de gösterildiği gibi, nano kumaştan iplik çekme numuneleri kontrol p-aramid kumaşı (KPO), nano bor karbür p-aramid kumaşı (BPO), çok duvarlı karbon nanotüpler p-aramid kumaşı (MPO) ve grafen nanoplateletleri p-aramid kumaşı (GPO) olarak tanımlanmıştır.

İlk adımda, p-aramid kumaşın (boyutları sırasıyla 120 mm × 300 mm, genişlik ve uzunluk) nemi, kumaş yüzeyindeki filamentler ile nano parçacıklar arasındaki nano kaplamayı iyileştirmek amacıyla 60°C'de 60 dakika boyunca, ısıtma hızı 15°C/dakika olacak şekilde etüvde giderilmiştir.

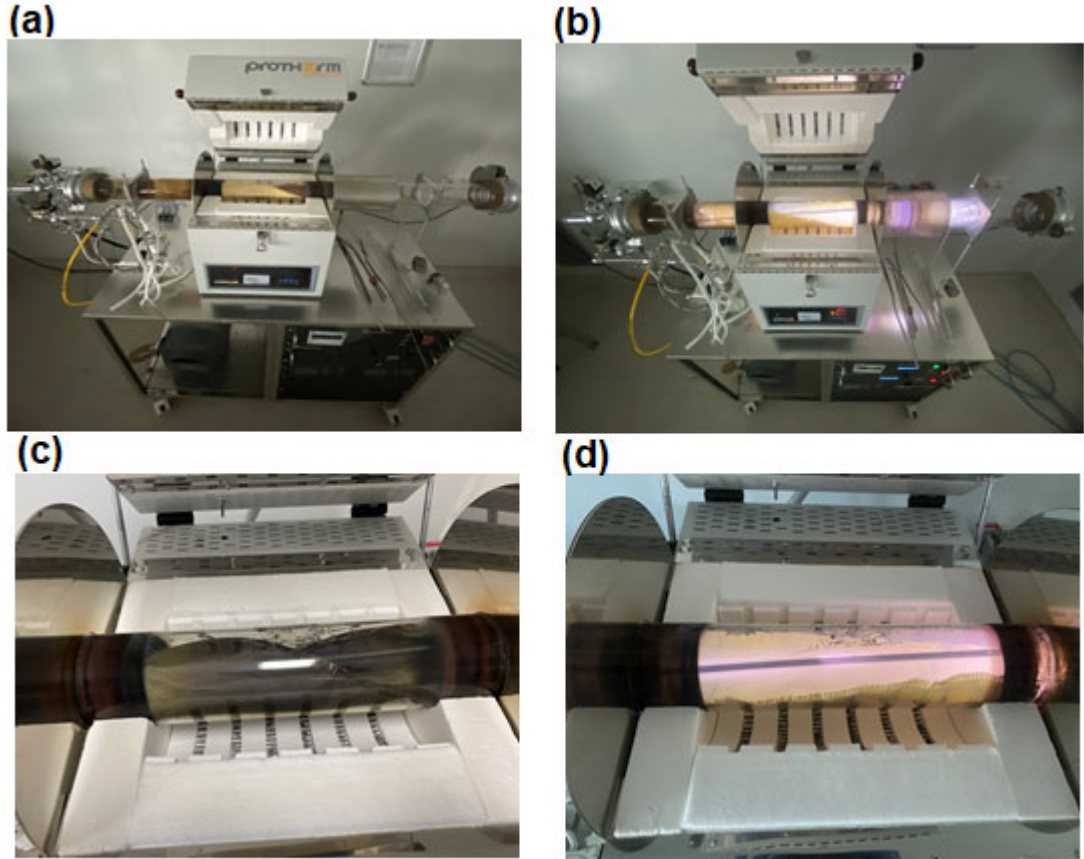
Nano h-B₄C (%0,3 ağırlıkça) tartılmış ve 250 mL etanole dökülmüştür. Çözelti, manyetik karıştırıcıda 350 rpm hızla 30 dakika karıştırılmış, erken topaklamanın (early agglomerations) önlenmesi için bu işlem yapılmıştır. Ardından, çözeltinin homojen bir şekilde dağılmasını sağlamak için ultrasonik banyoda (25°C, 60 dakika) karıştırılmıştır.

Sonraki adımda, p-aramid kumaş nano h-B₄C çözeltisine daldırılmış ve tekrar ultrasonik banyoda 25°C'de 120 dakika karıştırılmıştır. Kumaş, B₄C parçacığının kumaş yüzeyindeki filamentlerle etkileşime girmesi için 120 dakika boyunca kapalı bir kapta atmosfer koşullarında bekletilmiştir.

Kumaş, nano B₄C çözeltisinden çıkarılmış ve 2 bar basınç altında, 65°C'de 30 dakika boyunca pres altında bekletilmiştir. Ardından, 2 dakika boyunca çözeltiye daldırılmıştır. Bu işlem, nano parçacıkların kumaş yüzeyindeki filamentler üzerinde birikmesini sağlamak ve böylece nano parçacık ile filament demeti arasındaki mekanik kilitlemeyi iyileştirmek amacıyla üç kez tekrarlanmıştır. Bu işlem ayrıca, nanoparçacıkların kumaş yüzeyine homojen dağılmasını da sağlamaktadır. Sonraki adımda, p-aramid kumaş kalan çözeltinin içinde tekrar daldırılmış ve 78°C'de 4 saat boyunca ısıtma hızı 5°C/dakika olacak şekilde etüvde kurutulmuştur. Son olarak, etanol tamamen buharlaşmış ve nano h-B₄C kaplamalı p-aramid kumaşı iplik çekme testi için hazırlanmıştır. Aynı işlem adımları, MWCNTs ve GNPs kaplamalı kumaşlar üzerinde de iplik çekme testleri için uygulanmıştır.

2.2.2. Kimyasal buhar biriktirme (CVD) ve plazma kaplamalı p-aramid kumaşlar

Şekil 2.4 (a-d), kimyasal buhar biriktirme(CVD) ve kimyasal buhar biriktirme destekli plazma(PECVD) işlemlerini para-aramid kumaşa uygularken göstermektedir.

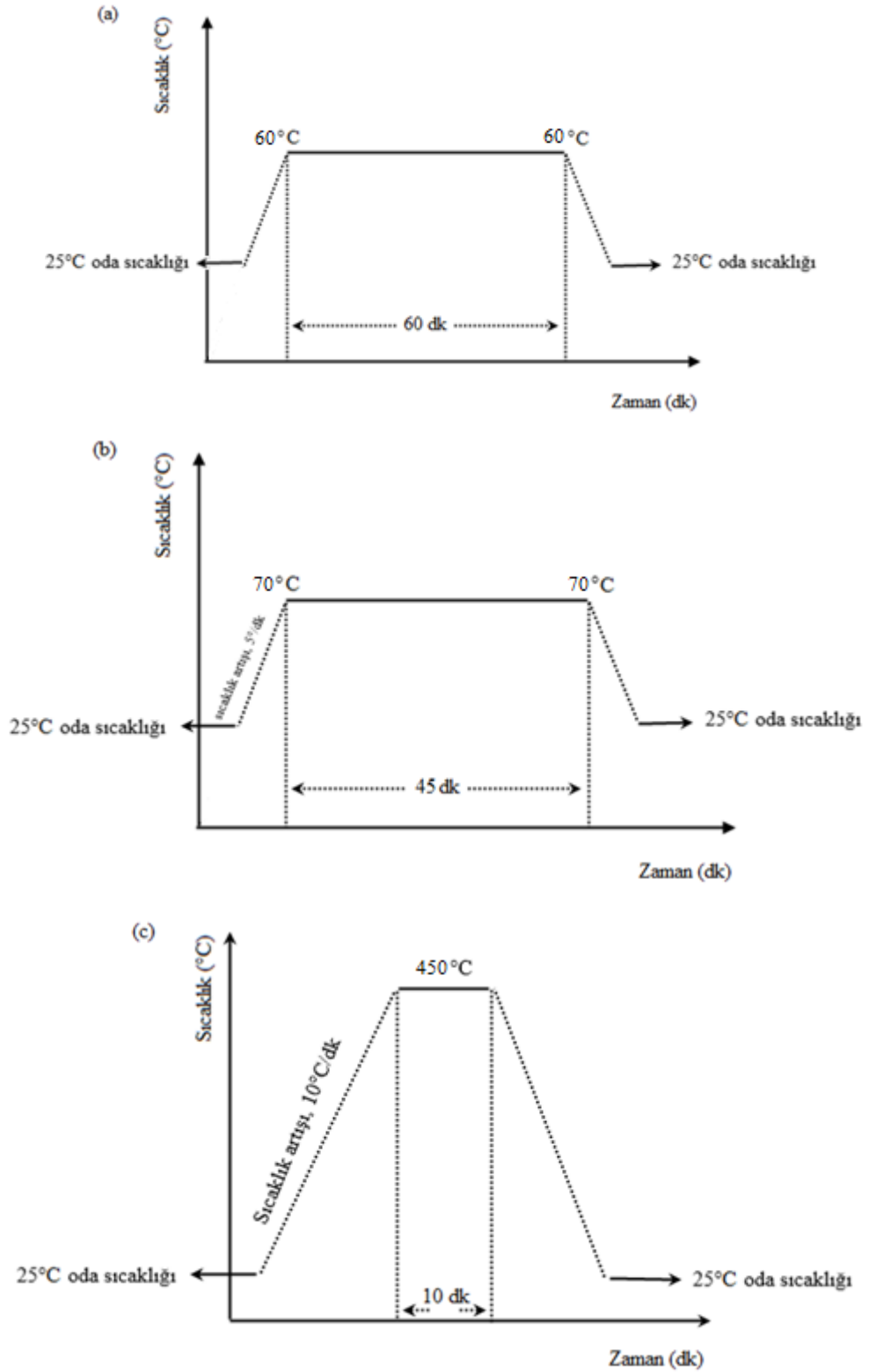


Şekil 2.4. (a) Kimyasal buhar biriktirme(CVD) işlemiyle para-aramid kumaş yüzeyinde çok duvarlı karbon nanotüp büyütme, (b) plazma işlemi (PECVD) ile kumaş yüzeyini prüzlendirme, (c) CVD işleminde p-aramid kumaş üzerine MWCNTs büyütme haznesi, (d) Para-aramid kumaşa plazma uygulama haznesi (Dijital fotoğraf).

Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) yöntemiyle karbon nanotüplerin (CNTs) p-aramid kumaş (gCPO) üzerine büyütülmesi Erciyes Üniversitesi Nanobilim ve Nanoteknoloji Araştırma Merkezi (ERNAM), Talas-Kayseri’de gerçekleştirildi. Para-aramid kumaş üzerinde olabildiğince düşük sıcaklıkta kumaşa zarar vermeden MWCNTs nin büyütülmesi için izlenen adımlar burada açıklandığı gibi gerçekleşmiştir. İlk olarak, p-aramid kumaş kesilerek 10 cm en x 30 cm boy formuna getirildi ve üzerindeki örneğin, su iticilik kimyasalları uzaklaştırıldı. Bu işlem, kumaşın 60°C’de 60 dakika süreyle ısıtılmasıyla yapıldı. Ardından, katalizör çözeltisi hazırlandı. Demir (III) nitrat nonahidrat ($\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) ve kobalt (II) nitrat hekzahidrat ($\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) etanol içinde 1:1

molar oranında çözülerek, çözeltinin konsantrasyonu 0.05 mol/L olacak şekilde karıştırıldı. Karışım, manyetik karıştırıcıda 350 rpm hızında 10 dakika boyunca çalkalandı ve sonrasında sonikasyon ile 10 dakika daha karıştırıldı. Kimyasal kaplamaları uzaklaştırılan p-aramid kumaşı, katalizör çözeltisine sonikasyon altında 10 dakika boyunca daldırıldı. Katalizörle kaplanan kumaş, sonrasında 70°C’de 45 dakika boyunca kurutuldu. Bu işlem, kumaşın üzerinde daha sağlam bir katalizör tabakası oluşturmak için yapıldı. Kumaş kuruduktan sonra, CVD fırının haznesinin ortasına yerleştirildi. Fırın ortamı vakumlandı ve reaktör basıncı 750 Torr (0.099 MPa) seviyesine getirildi.

Fırının sıcaklığı, argon gazı akışı altında 10°C/dakika hızında 450°C’ye yükseltildi. Bu sıcaklık kumaşın TGA verileri incelenerek ve kumaştaki kütle kaybının minimum olduğu değer olarak tespiti sonucu belirlenmiştir. Fırın bu sıcaklığa ulaştıktan sonra, CNT’lerin büyütülmesi için hidrojen (H₂), asetilen (C₂H₂) ve argon (Ar) gaz karışımı beslenmeye başlandı. Bu karışım, her bir gazın belirli bir hızda (0.15/0.15/0.3 L/dakika) verilmesiyle 10 dakika süreyle reaksiyonun devam etmesi sağlandı. Reaksiyonun sonunda, hidrojen ve asetilen gazlarının akışı kesildi ve argon gazı ile fırının sıcaklığı 25°C’ye düşene kadar soğutma işlemine geçildi. Bu adımlar, p-aramid kumaş üzerinde karbon nanotüp büyütülmesi için gereken bütün süreci detaylı bir şekilde tanımlamaktadır. Şekil 2.5(a-c)’de işlem esnasındaki sıcaklık(°C)-zaman(dakika) grafikleri görülmektedir. Ayrıca, Tablo 2.3 de büyütülmüş çok duvarlı karbon nanotüplerin ağırlıkça hacim fraksiyon sonuçları verilmiştir.



Şekil 2.5. (a) P-aramid kumaşının sıcaklık altında kimyasalların uzaklaştırılma diyagramı, (b) Katalizörle kaplanmış p-aramid kumaşın kurutulma diyagramı, (c) CVD tekniğinde MWCNT'lerin büyüme sürecinde sıcaklık-zaman diyagramı.

Büyütülmüş MWCNTs'lerin ağırlık hacim fraksiyonu formülü ve hesaplaması aşağıdaki bağıntılar üzerinden gerçekleştirilmiştir.

$$W_{vf} = [(W_{gf\ eff} - W_{loss}) / W_{gf\ eff}] \times 100 (\%) \dots\dots\dots(2.1)$$

CVD sürecinde p-aramid kumaş üzerine büyütülen MWCNT'leri hesaplamak için kullanılan girdi bilgileri aşağıda açıklanmıştır.

- W_d = Kontrol kumaşın ağırlığı (g)
- W_{df} = Kimyasallardan uzaklaştırılmış kumaşın ağırlığı (g)
- W_{cf} = Katalizör kaplanmış kumaşın ağırlığı (g)
- W_{gf} = Çok duvarlı karbon nanotüplerin büyütüldüğü kumaşın ağırlığı (g)
- W_{loss} = 450°C'deki kumaşın ağırlığı (g)
- $W_{gf\ eff}$ = Büyütülmüş Çok duvarlı karbon nanotüplerin ağırlığı (g)
- W_{vf} = g-Çok duvarlı karbon nanotüplerinlerin ağırlık yüzdesi (%)

$$W_{loss} = \%96,2426 \times W_d \dots\dots\dots(2.2)$$

%96,2426 değeri, TGA/DTA grafiğindeki kontrol p-aramidinin 450°C'deki bozunmayan kütle değeridir.

$$\text{Katalizör miktarı} = W_{cf} - W_{df} \dots\dots\dots(2.3)$$

$$W_{gf\ eff} = W_{gf} - \text{Katalizör miktarı} \dots\dots\dots(2.4)$$

$$W_{vf} = [(W_{gf\ eff} - W_{loss}) / W_{gf\ eff}] \times 100 (\%) \dots\dots\dots(2.5)$$

Tablo 2.3. Büyütülmüş çok duvarlı karbon nanotüplerin ağırlık-hacim oranları.

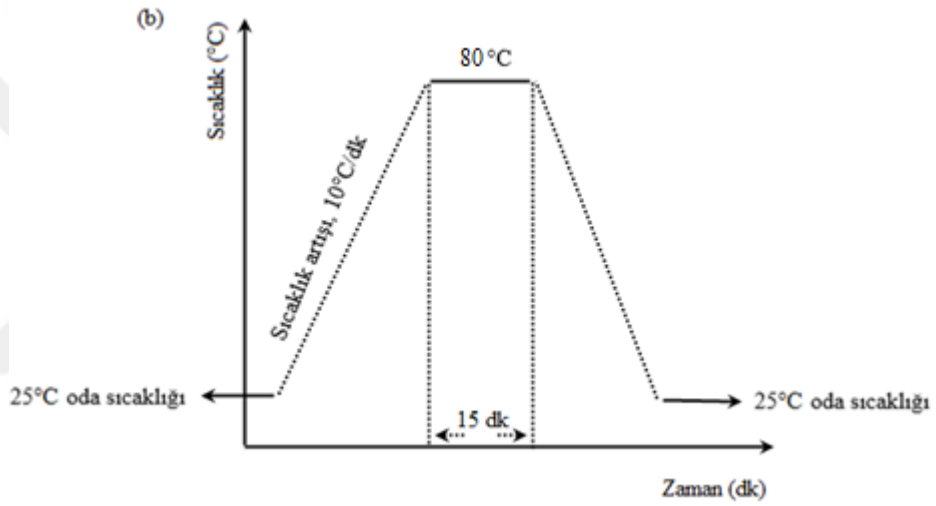
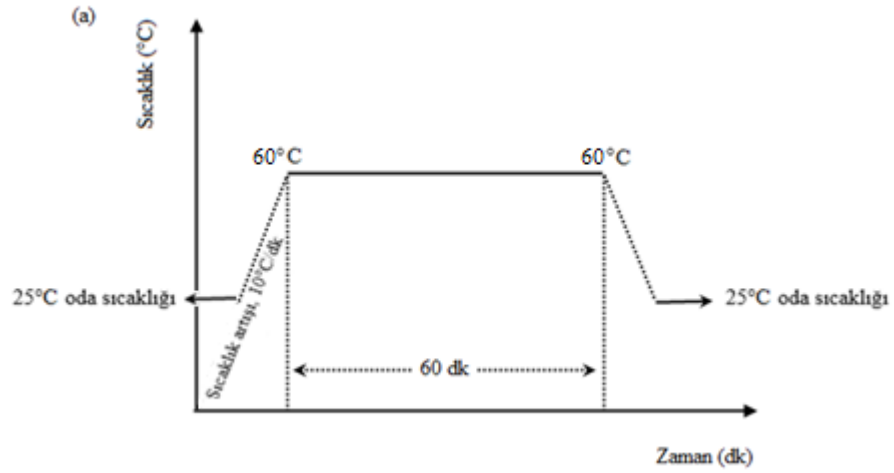
Numune	Kumaş ağırlığı - W_d	Kimyasallardan uzaklaştırılmış kumaş ağırlığı- W_{df}	Wt.% of g-desized fabric	Katalist uygulanmış kumaş ağırlığı- W_{cf}	Büyütülmüş karbon nanotüp ile birlikte kumaşın ağırlığı- W_{gf}	450°C sıcaklıkta kumaşın ağırlığı- W_{loss}	Kumaştaki katalist ağırlığı- W_{ct}	Büyütülmüş Çok duvarlı karbon nanotüplerin ağırlığı - $W_{gf\ eff}$	karbon nanotüplerin % ağırlığı - W_{vf}
	(g)	(g)	(%)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(%)
gCPO	18,506	18,118	2,096617	18,215	17,964	17,81066	0,097	17,867	0,31533

Kimyasal buhar biriktirme destekli plazma işlemi (PECVD) nin para-aramid kumaşa uygulama sebebi, kumaş yüzeyinde iplik formundaki filamentlerin yüzeyinde mikro bozunmalar yaparak sürtünme alanını büyütmektir. Böylelikle pürüzsüz filament yüzeyinde sürtünme alanı açarak filament-filament sürtünme katsayısını artırarak bunu bir enerji sönümleme mekanizması olarak kullanma amaçlanmıştır. Bunun için ise p-aramid kumaşı 10 cm eninde ve 30 cm boyunda kesilerek üzerinde yapılacak çalışmalar için ilk adım olarak, kumaşın üzerindeki su itici kimyasalları uzaklaştırılmıştır. Bu işlem, kumaşın 60°C’de 60 dakika de etüvde gerçekleştirildi. Ardından, kurumuş p-aramid kumaş, yatay PECVD fırın haznesinin merkezine yerleştirildi. Fırın ortamında vakum sağlanarak ve reaktör basıncı 10^{-2} Torr (1.3332e-5 MPa) seviyesine getirildi. Bu sırada fırın, vakum pompası ile vakumlandı ve radyo frekanlı (RF) güç kaynağı 300 Watt’a ayarlandı.

Sonraki aşamada, fırın sıcaklığı 10°C/dakika ısıtma hızıyla 80°C’ye çıkarıldı. Bu sırada, argon gazı akışı 30 sccm (standart cm³/dakika) hızında sağlandı ve fırın ısınmaya devam etti. Isıtma işlemi sırasında, fırın vakumda altında ve pompa açık bırakıldı. Bu ısıtma işleminden sonra, kumaş üzerinde plazma uygulaması argon gaz akışı 300 sccm (0.3 L/min) yapıldı. Plazma uygulaması 300 Watt’da, 5 dakika boyunca argon gazı akışı (300 sccm) altında gerçekleştirildi.

İşlem tamamlandıktan sonra, fırının soğuması için beklenerek oda sıcaklığına (20±2°C) ulaşması sağlanır. Soğuma işlemi yine argon gazı akışı altında, 30 sccm altında yapıldı. Bu şekilde, plazma ile yüzeyi pürüzlenmiş p-aramid kumaş elde edildi.

Bu süreç boyunca önemli parametreler arasında reaktör sıcaklığı 80°C olarak belirlenmiş ve reaktör basıncı 10^{-2} Torr seviyesinde tutulmuştur. Ayrıca, katalizör oranı 1:1 olarak ayarlanmış ve işlem 300 Watt güçle gerçekleştirilmiştir. Gaz akış hızı ise argon gazı için 30 sccm ve 300 sccm olarak belirlenmiştir. Plazma uygulama süresi ise 5 dakika olarak belirlenmiştir. Şekil 2.6(a-b), işlemler esnasındaki sıcaklık-zaman grafiklerini göstermektedir. Table 2.4 de ise plazma işlemi ile p-aramid kumaşa gerçekleşen kütle kaybı sonuçları verilmiştir.



Şekil 2.6. (a) P-aramid kumaşının sıcaklık altında kimyasalların uzaklaştırılma diyagramı, (b) PECVD tekniğinde plazma uygulama sıcaklık-zaman diyagramı.

Plazma ile işlenmiş kumaşın ağırlık-hacim oran hesaplama akışı aşağıda verildiği gibidir. Burada:

W_d : Kumaşın alınan (ham) ağırlığı (g)

W_{df} : Kimyasallardan uzaklaştırılmış kumaşın ağırlığı (g)

W_{dd} : Kimyasallardan uzaklaştırılmış kumaşın bozunma oranı (%)

W_{pf} : Plazma ile işlenmiş kumaşın ağırlığı (g)

W_{pd} : Plazma işlemi sırasında meydana gelen bozunmaların ağırlığı (g)

W_{pd} : Plazma işlemi sırasında meydana gelen bozunmaların oranı (%)

$$W_{dd} = (W_d - W_{df}) / W_d \quad (\%) \quad \dots\dots\dots(2.6)$$

$$W_{pd} = (W_{df} - W_{pf}) / W_{df} \quad (\%) \quad \dots\dots\dots(2.7)$$

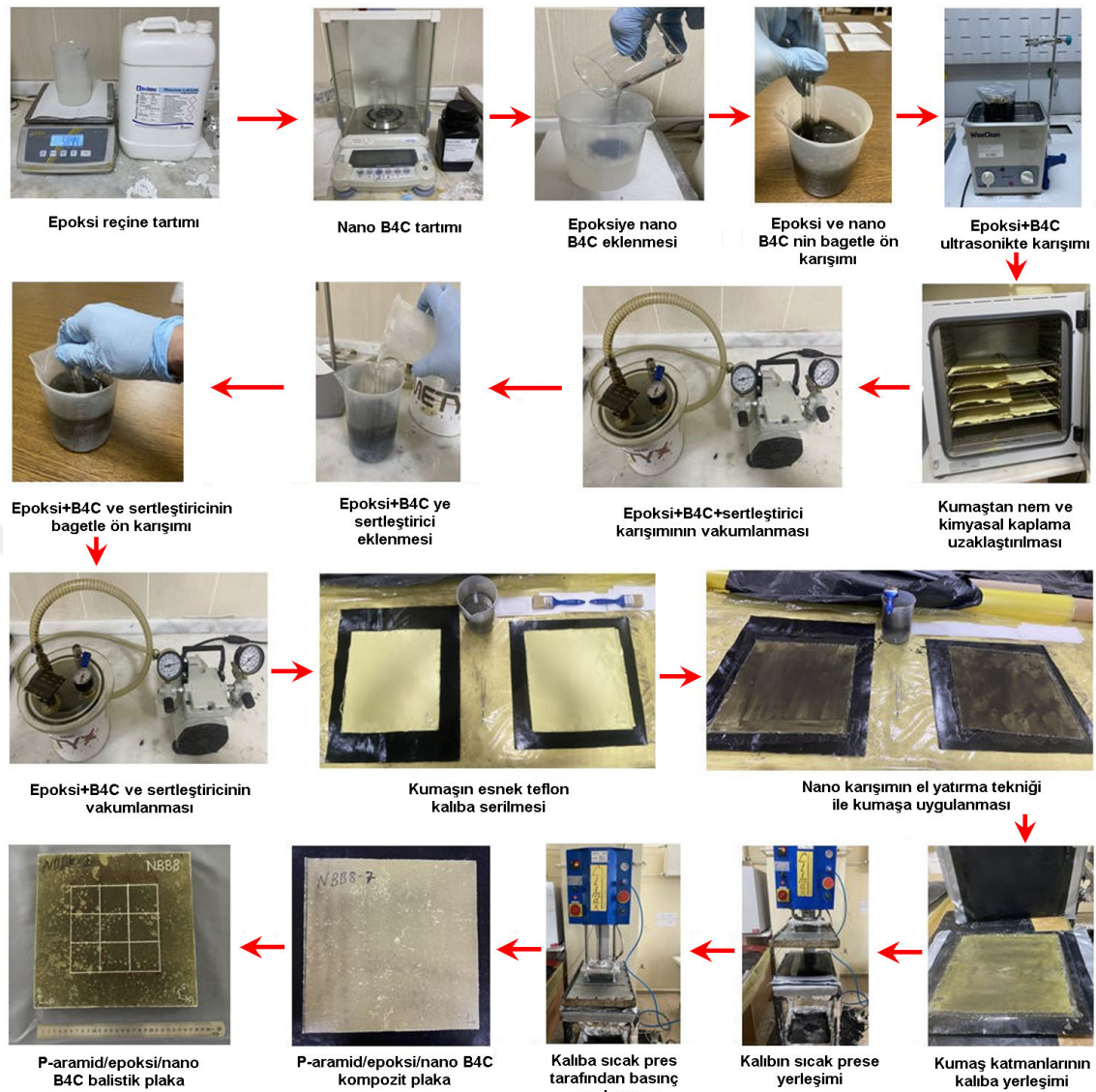
Tablo 2.4. Plazma işlemi ile p-aramid kumaşta kütle kaybı sonuçları.

Sample type	Kumaş ağırlığı-Wd (g)	Kimyasallardan uzaklaştırılmış kumaşın ağırlığı -Wdf (g)	Kimyasallardan uzaklaştırılmış kumaşın bozunma oranı -Wdd (%)	Plazma ile işlenmiş kumaşın ağırlığı -Wpf (g)	Plazma işlemi sırasında meydana gelen bozunmaların ağırlığı -Wpd (g)	Plazma işlemi sırasında meydana gelen bozunmaların oranı -Wpd (%)
PPO	17,955	17,570	2,14425	17,490	0,08	0,45532
RPO	17,595	17,188	2,31316	-	-	-

2.3. Nano katkılı para-aramid/epoksi kompozit ve balistik yapılar

2.3.1. Nanokompozit ve nanobalistik üretim adımları

Şekil 2.7’de nanobalistik ve nanokompozit üretim adımları gösterilmektedir. Buradan görüleceği üzere sadece nano h-B₄C katkılı p-aramid/epoksi kompozit ve nano plakanın üretimi gösterilmekte olup aynı işlem adımları ile MWCNTs ve GNPs katkılı kompozitler de üretilmiştir.



Şekil 2.7. Nanobalistik ve nanokompozit üretim adımları (Dijital fotoğraf).

İlk olarak, 33 cm uzunluk x 35 cm genişlik boyutlarında kesilen altı adet para-aramid kumaşın ağırlığı tartılır ve kaydedilir. Kumaşlar, daha sonra etüvde 60°C’de 60 dakika işleme tabi tutularak üzerindeki kimyasal kaplama ve nem uzaklaştırılır (Şekil 2.8a). Toplam kumaş ağırlığının iki katı kadar epoksi reçine (600 gram) hazırlanır. Ardından, bu 600 gram epoksiye sertleştirici eklenmesi için gerekli oran hesaplanır; epoksinin dörtte biri kadar (%25) sertleştirici gerekmektedir. Bu durumda, 600 gram epoksiye karşılık 150 gram sertleştirici kullanılır ve bu miktar cam bir beherde tartılır.

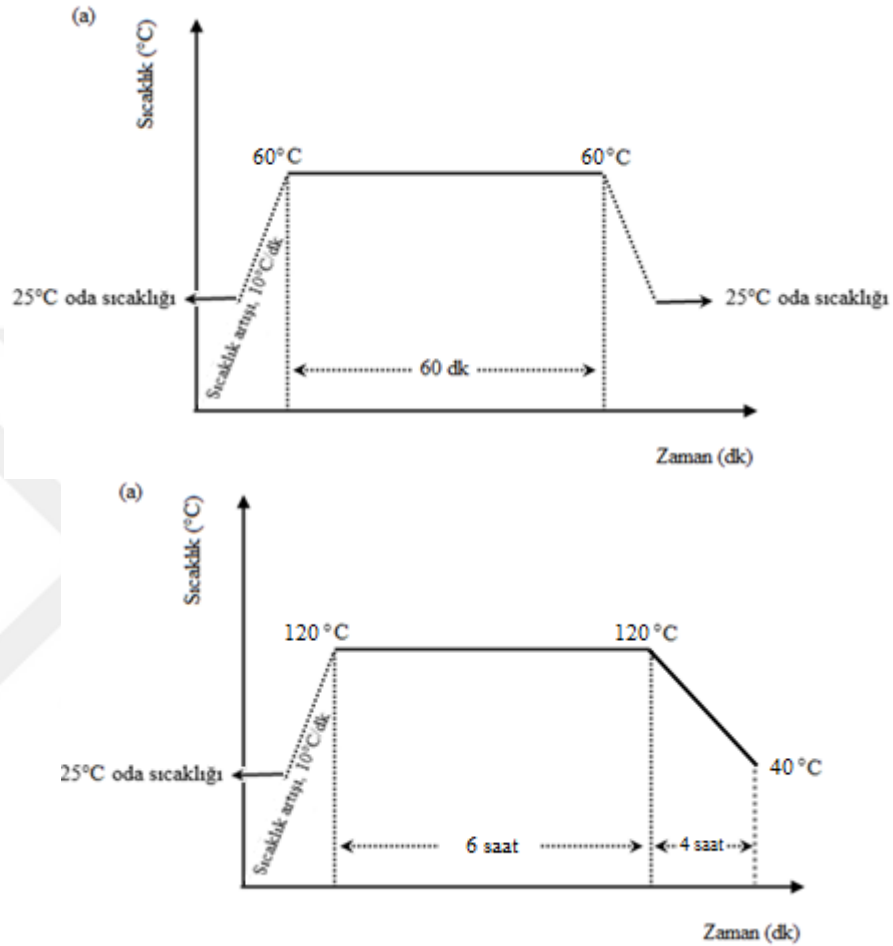
Nano hegzagonal bor karbür (nh-B₄C) de bu karışıma eklenmek üzere hazırlanır. Epoksi miktarının %0,3’ü kadar B₄C kullanılır ki bu da 600 gram epoksiye yaklaşık 1.8 gram

B₄C'e eşdeğer gelmektedir. Nano h-B₄C, cam bir beherin üzerine tartılarak hazırlanır ve karışımın topaklanmasını engellemek için yavaşça cam bir bagetle karıştırılarak epoksiye eklenir. Bu karışım, ayrıca 10 dakika boyunca sürekli olarak karıştırılır. Karışım, daha sonra ultrasonik karıştırıcıya yerleştirilmeden önce üzeri alüminyum folyo ile kapatılır. Ultrasonik karıştırıcının su haznesi kontrol edilir ve gerekirse su seviyesi, termometre ile ölçülüp 30°C'nin altında kalacak şekilde düzenlenir. Eğer suyun sıcaklığı artarsa, önceden buzdolabında soğutulmuş buz eklenir. Karışım, ultrasonik karıştırıcıda iki saat boyunca karıştırılmaya bırakılır. Bu süreç boyunca, suyun sıcaklığı bir termometre ile kontrol edilir ve suyun sıcaklığının 30°C'yi geçmemesi sağlanır. İki saatlik karıştırma süresi sonrasında, epoksi ve B₄C karışımı, 1 bar basınç altında 30 dakika süreyle vakumlanır. Vakumlama işlemi tamamlandıktan sonra, daha önce hazırlanan sertleştirici karışımı yavaşça eklenir ve cam baget ile orta hızda 10 dakika süreyle karıştırılır. Karıştırma işlemi tek yönde yapılır.

Son olarak, karışım yeniden 1 bar basınç altında 10 dakika vakumlanır. Vakum işlemi sonrası karışımdan yükselen hava kabarcıkları metal bir kaşıkla dikkatlice alınır. Bu sırada, daha önce nemi alınmış olan altı adet para-aramid kumaş, çözgü ve atkı yönü sabit olacak şekilde poliüretan sürülmüş teflonun üzerine yerleştirilir ve nano karışımın yüzeye tatbik edilmesi için hazır hale getirilir. Vakumdan çıkarılan epoksi-B₄C karışımı, hızla kumaşın ön ve arka yüzeyine fırça ile sürülür. Bu işlem sırasında, kumaşların üst üste gelmesiyle aralarında hava kabarcığı kalmaması sağlanır. Tüm bu işlemler 15 dakika içinde tamamlanmalıdır. Epoksi ile kaplanmış kumaşlar, 40x40 cm boyutlarında bir kalıbın üzerine düzgün bir şekilde yerleştirilir ve üzerine 35x35 cm'lik ikinci bir kalıp yerleştirilir.

Kalıplar, pres ve kompresör kürlenme işlemi için hazırlanır. Presin tablalarına, epoksinin yapışmasını engellemek için poliüretan sürülür. Hazırlanan kumaş katmanları presin haznesine dikkatlice yerleştirilir. Presin sıcaklığı 120°C'ye çıkarılır ve basınç 6 bar olarak ayarlanır. Presin üst tablası yavaşça aşağı iner ve 30 dakika içinde sıcaklık 120°C'ye ulaşır. Bu sıcaklıkta, presin basıncı 6 bar'a çıkarılır ve toplamda 6 saat süreyle beklenir (Şekil 2.7b). Altı saat sonra, sıcaklık 40°C'ye ayarlanır ve yaklaşık 4 saat 45 dakika boyunca bu sıcaklıkta beklenir. Sıcaklık 40°C'ye düştüğünde işlem tamamlanır. Son olarak, presten çıkarılan kompozit yapı, siyah plastik poşete sarılır ve en az üç gün boyunca bekletilerek tam olarak kürlenmesi sağlanır. Nano h-B₄C katkısı ile üretilen

para-aramid/epoksi kompozitler benzer şekilde MWCNTs ve GNPs katkılı paramid/epoksi kompozit yapılarada uygulanmıştır. Ayrıca, Şekil 2.8(a-b) de işlemler için sıcaklık-zaman grafikleri gösterilmiştir.



Şekil 2.8. (a) P-aramid kumaşın nem ve kimyasalların uzaklaştırılmasını gösteren sıcaklık-zaman diyagramı ve (b) P-aramid/epoksi nano B₄C katkılı kompozit ve nano balistik plakaların üretim süreçlerini gösterir sıcaklık-zaman diyagramı.

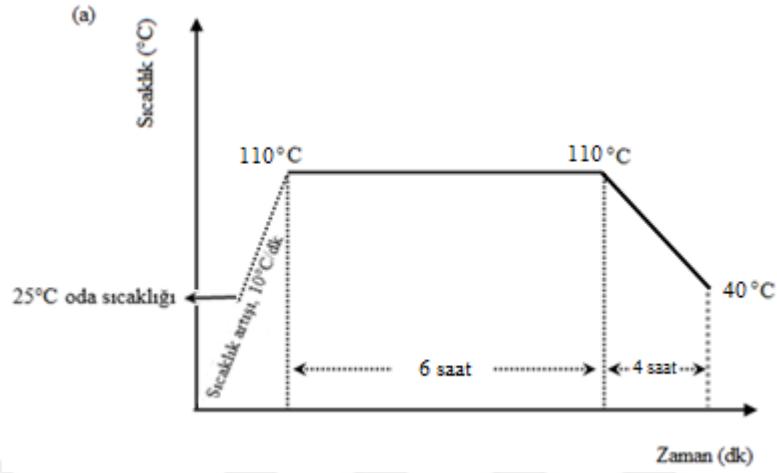
2.3.2. Nanobalistik plaka üretimi

Nano balistik plaka üretimi için ilk aşamada, altı kat kumaştan üretilen sekiz nano plakanın birleştirilmesi işlemi yapılmıştır. Bu sekiz plakanın birleşiminde toplamda yedi adet aralık bulunur. Her aralıkta, nano reçine kalınlığı olarak 100 mikron dikkate alınmıştır. Bu durumda, gerekli epoksi miktarı hesaplanır ve 588 gramlık bir epoksi, cam bir beherde tartılır. Bu 588 gramlık epoksinin dörtte biri kadar sertleştirici gerekmektedir. Yani, 588 gram epoksiye 147 gram sertleştirici eklenecek şekilde hazırlıklar yapılır. Sertleştirici, cam beherde tartıldıktan sonra beklemeye alınır. Nano bor karbür (h-B₄C)

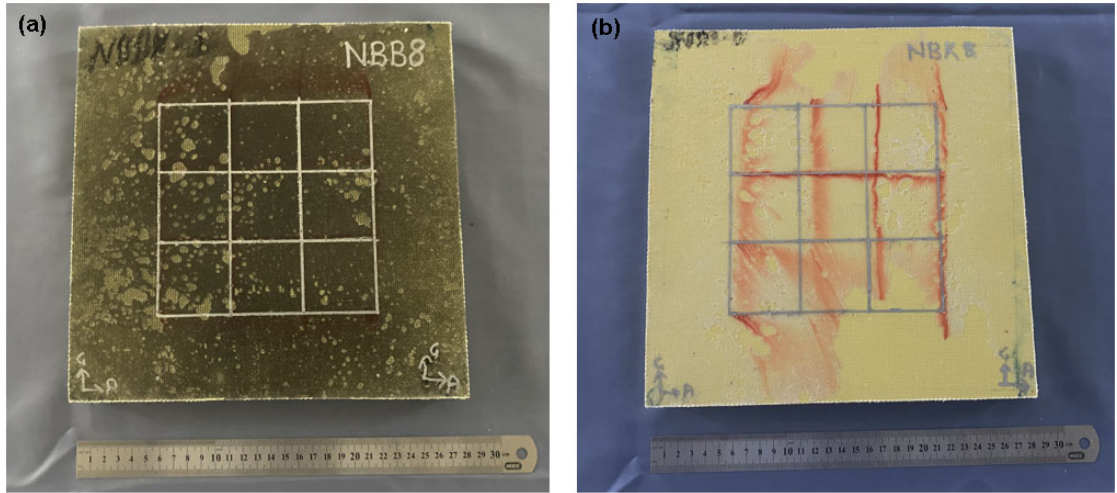
de epoksi karışımına eklenmek üzere hazırlanır. Epoksi miktarının %0,3'ü kadar nano B₄C kullanılır, bu da 588 gram epoksi için 1.764 gram nano B₄C eder. Nano B₄C, cam beherin üzerine tartılarak hazırlanır ve karışıma eklenirken topaklanmayı önlemek için cam bir bagetle sürekli olarak 10 dakika karıştırılır. Karışımın üzeri, ultrasonik karıştırıcıya konmadan önce alüminyum folyo ile kapatılır. Ultrasonik karıştırıcının su haznesi kontrol edilir. Su seviyesinin göstergenin altında olup olmadığına bakılır ve eğer gerekirse saf su eklenir. Karışım, daha sonra ultrasonik karıştırıcının haznesine yerleştirilir ve 2 saat boyunca bekletilir. Bu bekleme süresince, ultrasonik karıştırıcının haznesindeki suyun sıcaklığı bir termometreyle ölçülür. Sıcaklığın 30°C'yi geçmemesine özen gösterilir. Eğer suyun sıcaklığı artarsa, daha önce buzdolabında soğutulmuş plastik bir kap içindeki buz kütlesi, karıştırıcının haznesine eklenir.

İki saatlik karıştırma süresi sonunda, epoksi ve nano B₄C karışımı, 1 bar basınç altında 20 dakika vakumlanır. Vakumlama işlemi tamamlandıktan sonra, sertleştirici yavaşça karışıma eklenir ve cam bagetle orta hızda 10 dakika süreyle karıştırılır. Karıştırma işlemi tek yönde uygulanmıştır. Sonrasında, karışım tekrar 1 bar basınç altında 10 dakika daha vakumlanır. Vakumlama işlemi sırasında, karışımın yüzeyinde oluşan hava kabarcıkları varsa metal bir kaşıkla dikkatlice uzaklaştırılır. Vakumdan çıkarılan epoksi ve nano B₄C karışımı, iki plakanın her iki yüzeyine de sürülür. Plakalar, çözgü yönü sabit tutularak dikkatlice birleştirilir. Üst üste konan plakalar arasında hava kabarcığı kalmamasına özen gösterilir.

Birleştirilen plakalar, 40x40 cm boyutlarında bir kalıbın üzerine yerleştirilir. Üzerine ise 35x35 cm boyutlarında ikinci bir kalıp yerleştirilir. Kürleme işlemi için, pres ve kompresör hazır hale getirilir. Presin tablalarına, epoksinin yapışmasını engellemek amacıyla poliüretan sürülür. Hazırlanan plaka, presin haznesine düzgün bir şekilde yerleştirilir. Presin basıncı 1 bar, sıcaklığı ise $20 \pm 2^\circ\text{C}$ olarak ayarlanır. Presin üst tablosu aşağı indirilir ve bu sıcaklık 110°C'ye ayarlanır. 110°C'de 6 saat bekletilen plaka, sonrasında sıcaklık 40°C'ye düşürülür. Sıcaklık yaklaşık 4 saat sonra 40°C'ye ulaştığında, presin üst tablası kaldırılır ve nano balistik plaka presten çıkarılır (Şekil 2.9). Presten çıkarılan nano balistik plaka, siyah plastik poşete sarılarak en az 3 gün boyunca bekletilmesi sağlanır. Benzer süreç kontrol balistik plakaya da uygulanarak üretilmiştir. Şekil 2.9'da işlemler için sıcaklık-zaman grafiği ile Şekil 2.10(a-b) de nano bor karbür p-aramid/epoksi plaka ile kontrol amaçlı üretilmiş olan plaka görülmektedir.



Şekil 2.9. Nano B₄C katkılı p-aramid/epoksi kompozit balistik plakaların birleşim sürecini gösterir sıcaklık-zaman diyagramı.



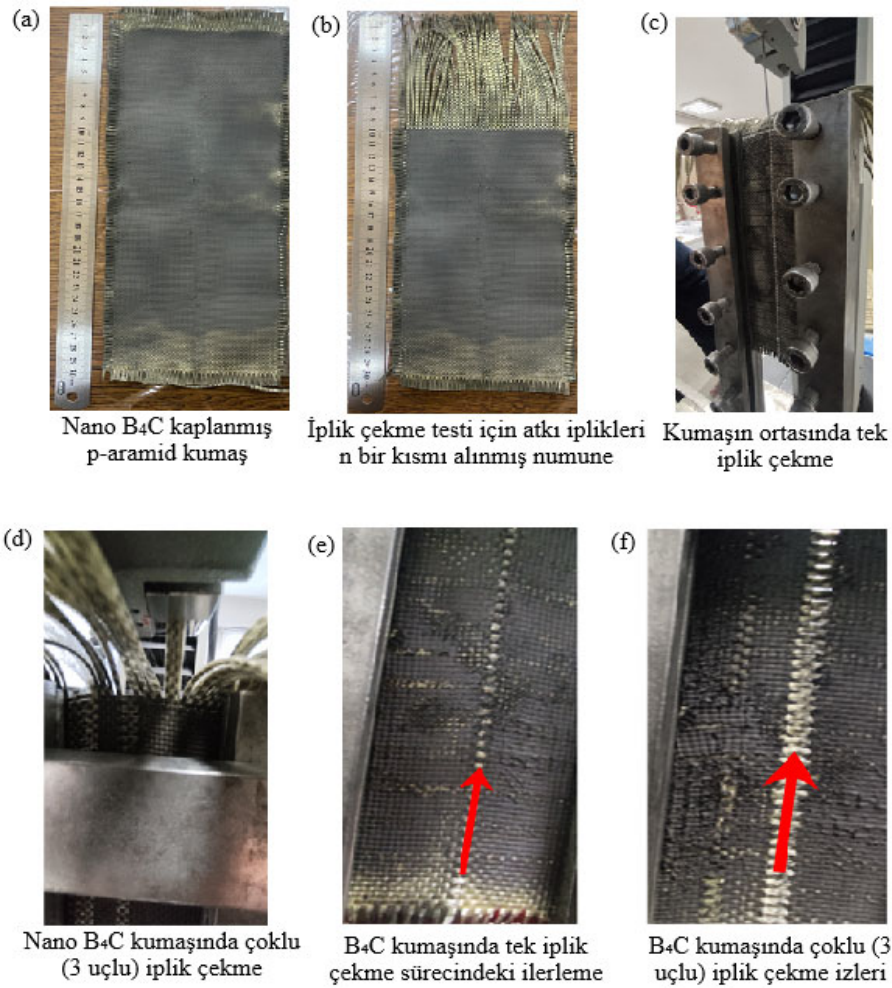
Şekil 2.10. (a) Sekiz katmanlı nano bor karbür p-aramid/epoksi balistik plaka ve (b) Sekiz katmanlı kontrol p-aramid/epoksi balistik plaka (Dijital fotoğraf).

2.4. Soft ve katı yapılar üzerine statik ve dinamik testler

2.4.1. Pull-out testleri

Kumaştan iplik çekme testleri, para-aramid bezayağı (1/1) kumaş yapısının didilmiş iplik uçları üzerinden iplikler arası sürtünmeyi belirlemek amacıyla gerçekleştirildi. Bu testler, tek iplik (1-iplik) ve çoklu iplikler (2-iplik ve 3-iplik) üzerinde yapılmış olup, farklı

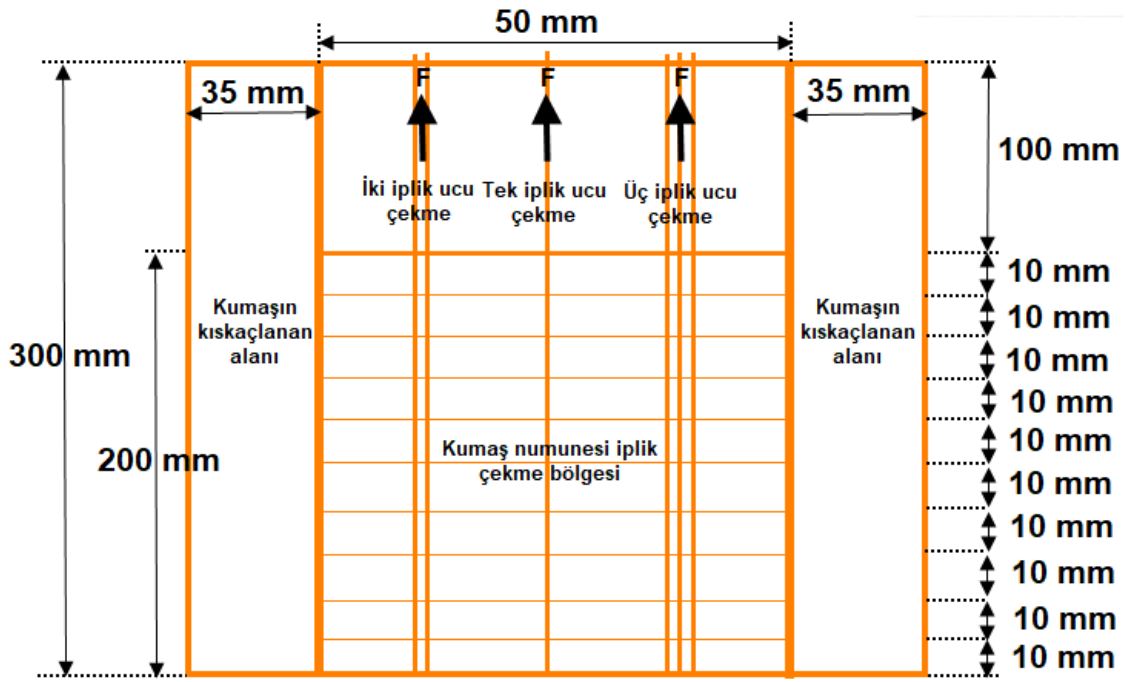
koşullarda sürtünme davranışını belirlemeye yöneliktir. Testler, bu amaç için özel olarak geliştirilen test düzenekleri kullanılarak yapılmıştır [45]. Şekil 2.11(a-f)'de nano kaplı para-aramid kumaşın çekme test cihazına yerleştirilmiş halde test sırasında tekli ve çoklu ipliklerin çekilmelerini göstermektedir.



Şekil 2.11. (a) Kumaştan iplik çekme için nano B₄C kumaş örneği, (b) İplik çekme testi için örneğin hazır hale getirilmesi, (c) Kumaş ortasından tek iplik çekimi, (d) Kumaştan 3 ipliğin aynı anda çekilmesi, (e) Tek iplik çekiminde GNPs kaplı kumaşta gerçekleşen çekim izi ve (f) Üç iplik çekiminde GNPs kaplı kumaşın oluşturduğu iz [238].

Nano kaplamalı kumaş numunelerinin boyutları 50 mm (genişlik) x 200 mm (uzunluk) olarak belirlenmiştir. Numunenin açılmış iplik uzunluğu 100 mm ve numunenin kenarını tutan toplam kenar uzunluğu 700 mm'dir. Şekil 2.12'de örneğin boyutları ve iplik çekme konumları şematik olarak görülmektedir. Tek iplik, önce 1. iplik olarak açılmış kenarın ortasından sırasıyla çekilmiş, ardından 2. ve 3. iplikler çekilmiştir. Ayrıca, çok iplikli

numunelerde, üç kez olmak üzere iki ve üç iplik başarıyla kumaştan çekilmiştir. Böylece, nano kaplamalı p-aramid kumaşlar için iplik çekme kuvvet(N)-yerdeğiştirme(mm) eğrileri elde edilmiştir. Kumaş, her iki kenarından ön gerilme uygulanmadan sıkıştırılmıştır. İplik çekme yönü, kumaşların çözgü yönünde gerçekleştirilmiştir. Test cihazı Instron 4411 olup, test hızı 100 mm/dakika olarak belirlenmiştir.



Şekil 2.12. İplik çekme numunesinin boyutları ve iplik çekme planı [238].

Ayrıca, tek iplik ucuna uygulanan çekme yükü nedeniyle kumaş yapısındaki iplikler arasındaki bağlantıdan kaynaklanan iplik uzunluğu olarak tanımlanan iplik çekme kuvveti ve krimp uzaması [45] belirlenmiştir. Öte yandan, kumaşta tek veya çok iplik ucundan uygulanan çekme yükü nedeniyle, krimp uzaması başlamadan önce alınan yer değiştirme (deplasman) olarak tanımlanan kumaş deplasmanı, örnek genişliğinin dar olması nedeniyle göz ardı edilmiştir. İplik çekme testi sırasında kumaşta ortaya çıkan büzülme (wrinkle) de kumaş kenarlarının sıkıştırılmış olması nedeniyle göz ardı edilmiştir. Ayrıca, kumaş bağlantı bölgelerinde çözgü ve atkı yönündeki iplik kaymaları basitleştirme amacıyla dikkate alınmamıştır. Bunun dışında, çekilen ipliklerde bazı filamentlerin kırıldığı gözlenmiştir. Bu kırılan filamentler göz ardı edilmiştir. İplik çekme kuvveti-yerdeğiştirme (N, mm) eğrileri, her bir iplik yoğunluğu için örnek yüzeyinin işaretlendiği maksimum iplik çekme kuvvetini bulmak için kullanılmıştır. Örneğin, 10

mm'lik aralıklarla ardışık değerler belirlenmiş, ilk bağlantı kopma kuvveti (N), iplik içi kayma dayanımı (N) ve tutunma-kayma kuvvetleri (N) olarak hesaplanmıştır.

2.4.2. Sürtünme testleri

Sürtünme testi, nano kaplamalı p-aramid kumaştan iplik çekme işlemi sırasında kuru ve ıslak tek (1-iplik) ve çok iplik uçlarında (2-iplik ve 3-iplik) statik sürtünme katsayısını bulmak amacıyla yapılmıştır. Bu nedenle, sürtünme testi, kapstan prensibine dayalı olarak Erciyes Üniversitesi, Tekstil Mühendisliği Bölümünde geliştirilen sürtünme test aparatı kullanılarak gerçekleştirilmiştir [239]. Şekil 2.13(a-b) de test sırasında nano kaplamalı ipliklerle yapılan sürtünme cihazının görünümleri verilmiştir.

Sürtünme cihazı, metal bir plaka üzerine yerleştirilmiş galvanizli çelik bir çubuğa (450 mm x 60 mm x 30 mm) tutturulmuş sürtünme silindirlerinden oluşmaktadır. Sürtünme silindirleri, termoplastik polimer (polioximetilen) bir tambur (20 mm x 70 mm) içine yerleştirilmiş iç galvanizli çelik bir çubuktan (10 mm x 130 mm) yapılmıştır. Tamburun her iki ucuna, nano kaplamalı ipliklerin çapraz sarılmasını sağlamak için çevresel olarak iğneler (1 mm çap x 15 mm uzunluk) yerleştirilmiştir. Test düzeneğinde, nano kaplamalı çözgü ipliği (lineer yoğunluk: 336 tex), sabit tamburun etrafına, sabit iğnelerle çapraz yönde sarılmıştır. Ardından, diğer bir nano kaplamalı çözgü ipliği (lineer yoğunluk: 336 tex, iplik uzunluğu: 150 mm) tamburun eksenine yerleştirilmiş, bir ucu sabit bir ağırlığı (W_1 , 120 gram) taşıyacak şekilde, diğer ucu ise demir tozu ile dolu bir konteynerden oluşan ikinci bir ağırlığı (W_2) tutacak şekilde düzenlenmiştir. Şekil 2.14(a-b) de sürtünme cihazının şematik görünümü verilmiştir.

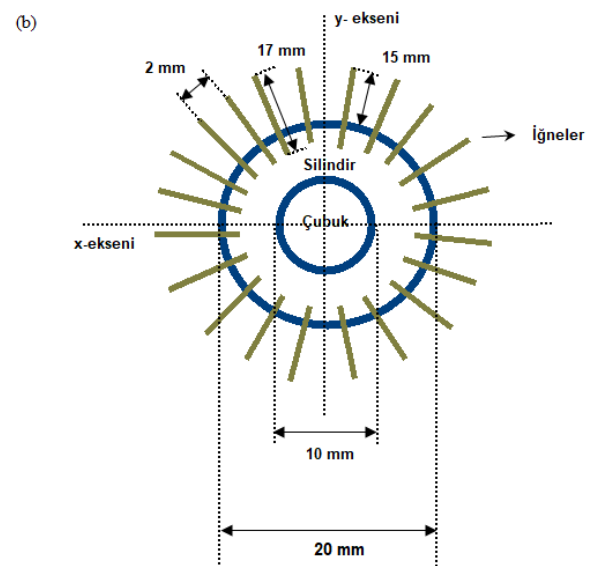
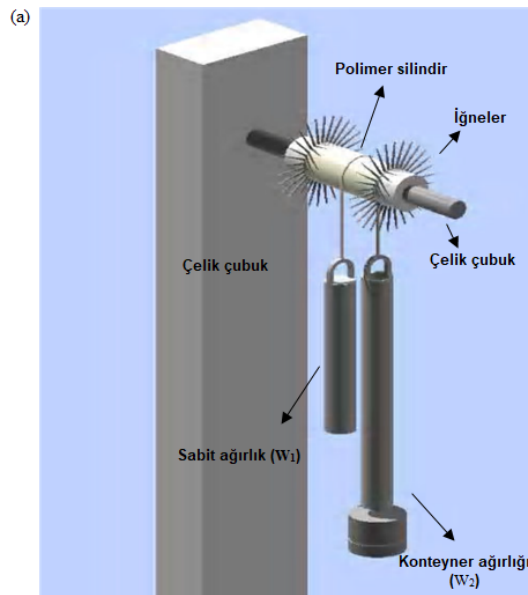


Nano B₄C katkılı para-aramid yapıda tek ipliğin sürtünme testi



Nano B₄C katkılı para-aramid yapıda üç ipliğin sürtünme testi

Şekil 2.13. (a) Nano B₄C kaplamalı iplikte tekli uç sürtünmesi (b) Nano B₄C kaplamalı iplikte üç iplik uç sürtünmesi.



Şekil 2.14. (a) Sürtünme cihazının şematik görünümü ve (b) Sürtünme cihazının şematik iğneli sarım ünitesi.

Sürtünme testi sırasında, konteynerin ağırlığı (W_2), demir tozu eklenerek kademeli olarak artırılmış ve dengeyi aşarak aşağıya hareket etmeye başlamıştır. Test sonlandırıldıktan sonra, W_2 konteyneri tartılmıştır. Nano kaplamalı çözgü ipliğindeki kırışıklık etkisi göz ardı edilmiştir ve iplik, uzamaz çoklu filament yapısı olarak kabul edilmiştir. Nano kaplamalı filamentlerin dolaşıklığı olmadığı ve nanoparçacıkların filament yüzeylerine homojen bir şekilde dağıldığı varsayılmıştır.

Statik sürtünme katsayısı, kapstan sürtünme prensiplerine (Euler denklemi) dayalı olarak hesaplanmıştır. Bağntı (2.8) aşağıda verilmiştir [240,46]:

$$\mu_s = \frac{1}{\pi} \ln \left(\frac{W_2}{W_1} \right) \dots \dots \dots (2.8)$$

Burda μ_s statik sürtünme katsayısı, W_1 ve W_2 sırası ile sabit ağırlık ve konteyner ağırlığıdır (gram). Öte yandan, kinetik sürtünme katsayısı (μ_{ks}), ilk iplik çıkma kuvveti sonrası çekme gücü-yer değiştirme (N, mm) eğrisinin tutunma-kayma (stick-slip) fazından doğrudan belirlenir. Bu katsayı, kumaşın her 10 mm deki pik yoğunluğuna karşılık gelen çekme gücüne bağıntı (2.8) uygulanarak elde edilmiştir.

2.4.3. Statik mekanik testleri

Kontrol, nano bor karbür, grafen nano plaka katkılı ve nano hibrit (nano bor karbür ve grafen nano plaka karışımı) p-aramid/epoksi nano kompozitler üzerinde yürütülen statik mekanik testler ki bunlar çekme, basma, 3-nokta eğilme, kısa kiriş (short beam), katarası basma (aksiyal)-çözgü ve atkı yönü, katarası basma (kalınlık)-çözgü ve atkı yönü' nü içermekte olup nano kompozit yapıların mekanik performanslarının ve bozunma modlarının belirlenmesi amacı ile gerçekleştirilmiştir. Tablo 2.5 de statik mekanik testler ve kullanılan örneklerin boyutları ve açıklamaları verilmiştir. Mekanik testlerden sonra bozunan örnekler görüntü yöntemleri ile bozunma modları belirlenerek gerekli yorumlar ve tanımlamalar yapılmıştır.

Tablo 2.5. Nano katkılı p-aramid/epoksi kompozitler üzerinde yapılan statik mekanik testler.

Örnek kodu	Yapılar	En x Boy x Kalınlık mm x mm x mm	Katman sayısı	Nano malzeme ve yüzde oranlar (%)
Çekme				
NKKT	Kontrol p-aramid/epoksi kompozit	27 x 254,67 x 3,25	6	-
NKBT	B ₄ C/epoksi p-aramid nanokompozit	27 x 251,67 x 3,29	6	Nano hegzagonal bor karbür (nh-B ₄ C, %0,3)
NKGT	GNPs/epoksi p-aramid nanokompozit	27 x 253,67 x 3,39	6	Grafen nano plakalar (GNPs, %0,3)
NBGT	B ₄ C/GNPs/epoksi p-aramid nanokompozit	27 x 251 x 3,44	6	Eşit oranda B ₄ C(%0,3) +GNPs(%0,3) karışımı
Basma				
NKKC	Kontrol p-aramid/epoksi kompozit	27 x 34 x 3,24	6	-
NKBC	B ₄ C/epoksi p-aramid nanokompozit	26 x 33 x 3,36	6	Nano hegzagonal bor karbür (nh-B ₄ C, %0,3)
NKGC	GNPs/epoksi p-aramid nanokompozit	27 x 33 x 3,40	6	Grafen nano plakalar (GNPs, %0,3)
NBGC	B ₄ C/GNPs/epoksi p-aramid nanokompozit	26 x 33 x 3,37	6	Eşit oranda B ₄ C(%0,3) +GNPs(%0,3) karışımı
Eğilme (3-nokta)				
NKKF	Kontrol p-aramid/epoksi kompozit	14 x 129 x 3,15	6	-
NKBF	B ₄ C/epoksi p-aramid nanokompozit	13 x 128 x 3,29	6	Nano hegzagonal bor karbür (nh-B ₄ C, %0,3)
NKGF	GNPs/epoksi p-aramid nanokompozit	14 x 128 x 3,45	6	Grafen nano plakalar (GNPs, %0,3)
NBGF	B ₄ C/GNPs/epoksi p-aramid nanokompozit	13 x 126 x 3,31	6	Eşit oranda B ₄ C(%0,3) +GNPs(%0,3) karışımı
Kısa kiriş (short-beam)				
NKKS	Kontrol p-aramid/epoksi kompozit	13 x 42 x 3,21	6	-
NKBS	B ₄ C/epoksi p-aramid nanokompozit	13 x 42 x 3,33	6	Nano hegzagonal bor karbür (nh-B ₄ C, %0,3)
NKGS	GNPs/epoksi p-aramid nanokompozit	13 x 42 x 3,34	6	Grafen nano plakalar (GNPs, %0,3)
NBGS	B ₄ C/GNPs/epoksi p-aramid nanokompozit	12 x 41 x 3,35	6	Eşit oranda B ₄ C(%0,3) +GNPs(%0,3) karışımı
Katarası basma (aksiyal)-çözgü yönü				
NBKWIC	Kontrol p-aramid/epoksi kompozit	32 x 45,17 x 27,51	48	-
NBBWIC	B ₄ C/epoksi p-aramid nanokompozit	34 x 43,67 x 27,73	48	Nano hegzagonal bor karbür (nh-B ₄ C, %0,3)
Katarası basma (aksiyal)-atki yönü				
NBKVIC	Kontrol p-aramid/epoksi kompozit	33 x 46 x 27,70	48	-
NBBVIC	B ₄ C/epoksi p-aramid nanokompozit	34,17 x 45,5 x 27,25	48	Nano hegzagonal bor karbür (nh-B ₄ C, %0,3)
Katarası basma (kalınlık)-çözgü yönü				
NBKWCT	Kontrol p-aramid/epoksi kompozit	31,5 x 37,83 x 27,35	48	-
NBBWCT	B ₄ C/epoksi p-aramid nanokompozit	34 x 37,83 x 27,53	48	Nano hegzagonal bor karbür (nh-B ₄ C, %0,3)
Katarası basma (kalınlık)-atki yönü				
NBKVCT	Kontrol p-aramid/epoksi kompozit	33 x 37 x 27,23	48	-
NBBVCT	B ₄ C/epoksi p-aramid nanokompozit	34 x 39,5 x 27,24	48	Nano hegzagonal bor karbür (nh-B ₄ C, %0,3)

2.4.3.1. Çekme testi

Kontrol, nano h-B₄C/epoksi p-aramid nanokompozit, GNPs/epoksi p-aramid nanokompozit ve nano bor karbür nano grafen plaka hibritli p-aramid/epoksi kompozitlerin çekme dayanımı testleri, 5 kN yük hücresine sahip ve TrapeziumVR yazılımı ile donatılmış bir Shimadzu AG-XD (JP) test cihazında gerçekleştirilmiş ve ASTM D3039-14 standardına dayalı olarak yapılmıştır [241]. Şekil 2.15(a-c) de çekme test makinasında p-aramid kompozitlerin çekme sırasındaki görüntüleri verilmiştir. Çekme test hızı standard göz önüne alınarak 2 mm/dakika olarak belirlenmiştir. Test boyutları 25 mm (genişlik) x 250 mm (uzunluk) olup, 3,25-3,44 mm aralığında kalınlığa sahiptir. Her bir örneğe uygulanan çekme yükü çözgü yönündedir. Nihai çekme dayanımı, bağıntı (2.9) kullanılarak hesaplanmıştır. Gerekli her veri noktasındaki çekme gerilmesi ve şekil

değişimleri bağıntı (2.10) ve (2.11) ile bulunmuştur. Bağıntı (2.12), gerilme-uzama eğrisinin elastik bölgesindeki çekme modülünü temsil etmektedir.

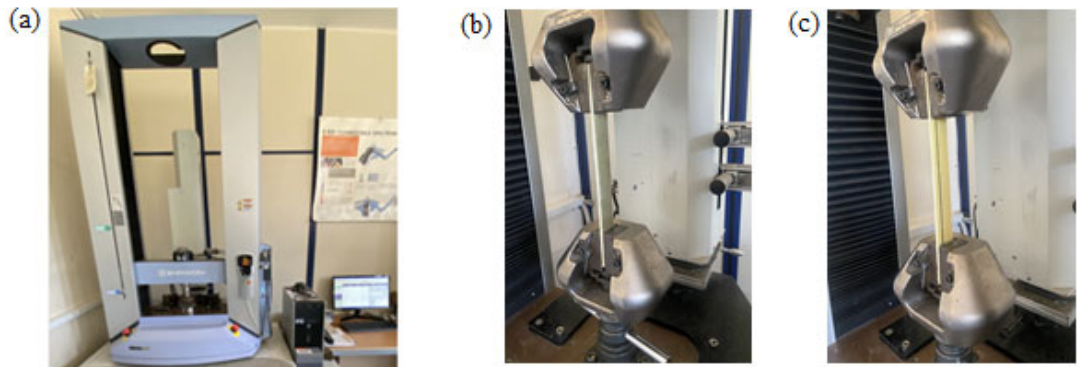
$$F = \frac{P}{A} \dots\dots\dots(2.9)$$

$$\sigma_i = \frac{P_i}{A} \dots\dots\dots(2.10)$$

$$\varepsilon_i = \frac{\delta_i}{L_g} \dots\dots\dots(2.11)$$

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \dots\dots\dots(2.12)$$

Burada, F maksimum çekme dayanımını (MPa), P bozunma öncesindeki maksimum kuvveti (N), A ortalama kesit alanını (mm²), σ_i ise i. veri noktasındaki çekme gerilmesini (MPa), P_i ise i. veri noktasındaki kuvveti (N), ε_i ise i. veri noktasındaki çekme şekil değişimini (deformasyon), δ_i ise i. veri noktasındaki ekstansometre yer değiştirmesini (mm), L_g ekstansometre ölçüm uzunluğunu (mm), E çekme elastik modülünü (GPa), $\Delta\sigma$ ise iki deformasyon noktası arasındaki uygulanan çekme gerilmesindeki farkı (MPa), $\Delta\varepsilon$ ise iki deformasyon noktası arasındaki uygulanan şekil değişimindeki farkı ifade eder.



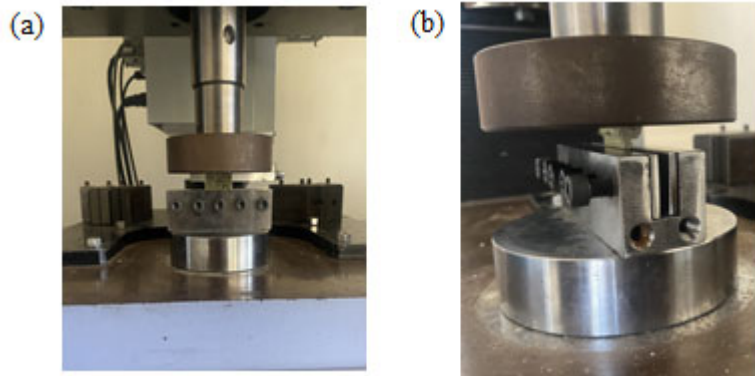
Şekil 2.15. (a) Çekme testi cihazı (b) Nano katkılı para-aramid/epoksi kompozit yapının çekme testi sırasındaki görünümü (c) Para-aramid/epoksi (kontrol) kompozit yapının çekme testi sırasındaki görünümü.

2.4.3.2. Basma testi

Kontrol, nano h-B₄C/epoksi p-aramid nanokompozit, GNPs/epoksi p-aramid nanokompozit ve nano bor karbür/nano grafen plaka hibritli p-aramid/epoksi kompozitlerin basma dayanımı testleri, 5 kN yük hücresine sahip ve TrapeziumVR yazılımı ile donatılmış Shimadzu AG-XD (JP) test cihazında gerçekleştirilmiş ve ASTM D695-08 standardına dayalı olarak yapılmıştır [242]. Basma test hızı standard göz önüne alınarak 1,3 mm/dakika olarak belirlenmiştir. Basma testi için özel olarak tasarlanmış bir fikstür kullanılarak test örneklerine işlem yapılmıştır. Numunelerin test boyutları, ASTM D695-08 standardı göz önünde bulundurularak 34 mm (uzunluk) × 27 mm (genişlik) × 3,24-3,40 mm (kalınlık) olarak belirlenmiştir. Şekil 2.16(a-c) da basma testi deneysel düzeneklerinin şematik diyagramı görülmektedir. Basma testi için en az üç kompozit numune teste tabi tutulmuş ve sonuçların ortalama değeri alınmıştır. Numunenin basınç dayanımı, en yüksek basınç yükünün, kesit alanına bölünmesiyle belirlenir. Basınç dayanımını hesaplamak için, aşağıdaki bağıntı (2.13) kullanılmıştır.

$$F_{cu} = \frac{F_{max}}{A} \dots\dots\dots(2.13)$$

Burada, F_{cu} basma dayanımını (MPa) belirtirken, F_{max} bozunma öncesindeki maksimum kuvveti (N) ve A ise kesit alanını (mm²) temsil etmektedir.



Şekil 2.16. (a) Nano katkılı para-aramid/epoksi kompozit yapıların fikstür yardımı ile basma testi işlemi (b) Fikstür ve numunenin test sonrası yakın çekim görüntüsü.

2.4.3.3. Eğilme (3-nokta) testi

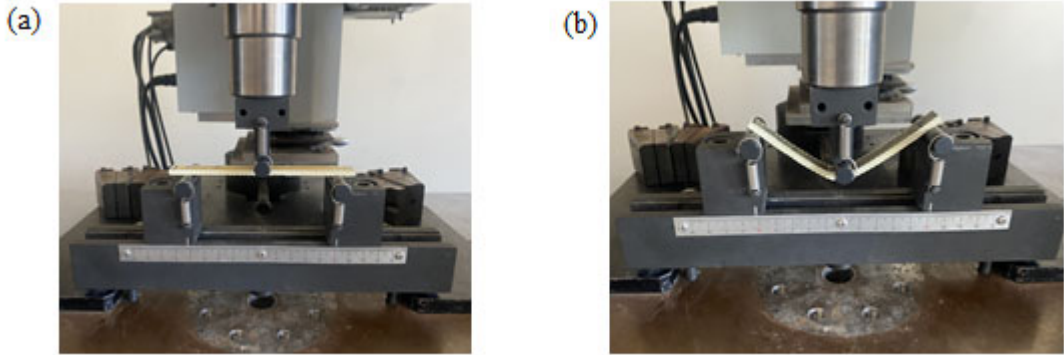
Nano, hibrit nano ve kontrol kompozitlerin tümü üç noktalı eğilme testleri, Shimadzu AG-XD 50 (Japonya) test cihazında, 5 kN yük hücresi ile Trapezium® yazılımı kullanılarak ASTM D790-10 [243] standardına göre yapılmıştır. Eğilme test hızı standard göz önüne alınarak 1,3653 mm/dakika olarak seçilmiştir. Test boyutları 14 mm (genişlik) x 128 mm (uzunluk) x 3,15-3,45 mm (kalınlık) olarak belirlenmiştir. L/d (destek açıklığı/kalınlık) oranı 32/1'dir. Her bir örneğe uygulanan eğilme yükü, kumaşın boyuna (warp) doğrultusundadır. Şekil 2.17(a-b) eğilme test cihazı ve örneklerin test esnasındaki yükleme durumunu göstermektedir. Bağıntılar (2.14)–(2.16), sırasıyla eğilme gerilmesini, modülünü ve şekil değişimini göstermektedir. Eğilme testi, standart laboratuvar atmosferinde, $23 \pm 2^\circ\text{C}$ sıcaklık ve $\%50 \pm 10$ nem oranı altında yapılmıştır.

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} \dots\dots\dots(2.14)$$

$$E_B = \frac{L^3m}{4bd^3} \dots\dots\dots(2.15)$$

$$\varepsilon_f = \frac{6Dd}{L^2} \dots\dots\dots(2.16)$$

Burada, σ_f eğilme dayanımını (flextural stress) (MPa); P yük-şekil değişimi eğrisindeki bir noktadaki yükü (N); L destek açıklığını (mm); b test edilen kirişin genişliğini (mm); d test edilen kirişin kalınlığını (mm); E_B eğilme modülünü (GPa); m yük-şekil değişim eğrisinin ilk doğru bölümünün eğimini; ε_f eğilme uzaması (flextural displacement) (%); D ise kirişin ortasındaki maksimum şekil değişimini (mm) ifade etmektedir.



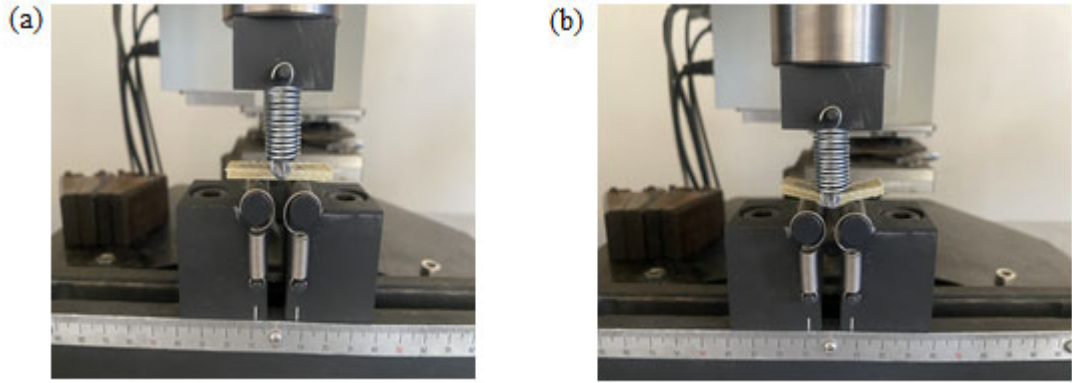
Şekil 2.17. (a) Para-aramid/epoksi kompozit yapının (kontrol) 3-nokta eğme fikstüründe eğilme testine başlama konumu (b) Nano katkılı para-aramid/epoksi kompozit yapının test esnasındaki eğilme işlemi.

2.4.3.4. Kısa kiriş eğme (Short-beam, 3-nokta) testi

Nano bor karbür, GNPs katkılı ve hibrit kompozitlerin kısa kiriş testi, Shimadzu AG-XD 50 (Japonya) test cihazında, 5kN yük hücreesine sahip Trapezium® yazılımı ile ASTM D2344-13 standardına dayalı olarak yapılmıştır [244]. Şekil 2.18(a-b) de kısa kiriş testinde kompozit örneğin başlangıç ve bozunma konumu görülmektedir. Burada 3-nokta eğilme fikstürü kullanılmıştır. Test hızı, test standardı göz önüne alınarak 1,0 mm/dakika olarak düzenlenmiştir. Test örneğinin ortalama ölçülen boyutları 13 mm (genişlik) x 42 mm (uzunluk) x 3,21-3,35 mm (kalınlık) olarak belirlenmiştir. Destek span uzunluğu ile örnek kalınlığı oranı standard göz önüne alınarak 4.985/1 olarak seçilmiştir. Kısa kiriş testi yöntemi ile katarası kayma dayanımı (gerilmesi) elde etmek için bu oranın uygun olduğu önerilmiştir [245]. Her örneğe uygulanan yük, kumaşın (0°, boyuna) yönünde uygulanmıştır. Test, standart laboratuvar atmosferinde, 23°C ±2°C sıcaklık ve %50 ±10 nem oranında gerçekleştirilmiştir. Uygulanan yük altında, eğilme gerilmeleri örneğin üst yüzeyinde basınçlı ve alt yüzeyinde çekme gerilmeli olup, bu gerilmeler, malzemenin elastik sınırları içinde örnek kalınlığı boyunca doğrusal olarak değiştiği varsayılmıştır [245]. Yük ve destek noktaları etrafındaki gerilme yoğunluğu göz ardı edilirse, nötr düzlemde (katarası kayma yükünün normalindeki referans eksenini), her yüzeyde sıfırdan parabolik olarak değişen, maksimum katarası kayma (interlaminar shear) gerilmesinin olduğu varsayılabilir. Bu nedenle, gerilme durumu nötr düzlemde tamamıyla kayma olarak gerçekleşmelidir [245]. ASTM D2344 standardında, bağıntı (2.17) 3-nokta eğilme yüklemesi altındaki katarası kayma dayanımını göstermektedir [244].

$$F^{sbs} = 0,75 \times \frac{P_m}{b \times h} \dots\dots\dots(2.17)$$

Burada, F^{sbs} kısa kiriş dayanımını (MPa), P_m test sırasında gözlemlenen maksimum yükü (N), b örnek genişliğini (mm) ve h örnek kalınlığını (mm) belirtmektedir.



Şekil 2.18. (a) Para-aramid/epoksi kompozit yapının (kontrol) fikstür yardımı ile kısa kiriş eğme testi ve (b) Nano katkılı para-aramid/epoksi kompozit yapının test esnasındaki bozunması.

2.4.3.5. Katarası basma (aksiyal) testi

Nano bor karbür ve kontrol kompozitlerin çözgü ve atkı yönü katarası basma (aksiyal) testi, Shimadzu AG-XD 50 (Japonya) test cihazında, 5kN yük hücresine sahip Trapezium® yazılımı ile ASTM D695-08 standardına dayalı olarak yapılmıştır [242]. Test hızı test standardı göz önüne alınarak 1,3 mm/dakika olarak düzenlenmiştir. Numunelerin test boyutları, ASTM D695-08 standardı göz önüne alınmış ancak bu tez kapsamında geliştirilen kompozitin boyutlarına göre 45,17 mm (uzunluk) × 32 mm (en) × 27,51-27,73 mm (kalınlık) olarak belirlenmiştir. Şekil 2.19(a-e) da katarası basma (aksiyal) testi deneysel düzeneği görülmektedir. Her plaka için en az üç kompozit numune teste tabi tutulmuş ve sonuçların ortalaması alınmıştır. Katarası basma (aksiyal) dayanımı, en yüksek basınç yükünün örneğin ölçülen kesit alanına bölünmesiyle belirlenir. Bunun için aşağıdaki bağıntı (2.18) kullanılmıştır.

$$F_{cu} = \frac{F_{max}}{A} \dots\dots\dots(2.18)$$

Burada, F_{cu} katarası basma dayanımını (MPa) belirtir, F_{max} ise kopmadan önceki maksimum kuvveti (N) temsil eder ve A ise kesit alanını (mm²) ifade eder.



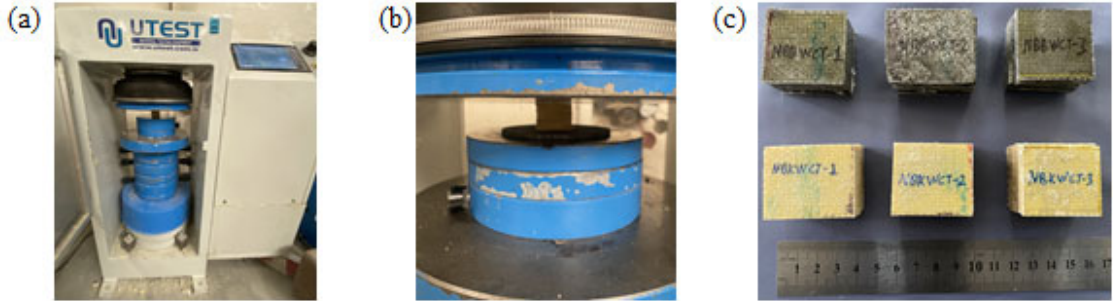
Şekil 2.19. Para-aramid/epoksi kompozit yapının (8 katlı) fişkür yardımı ile katarası basma (aksiyal) testi işlemi.

2.4.3.6. Katarası basma (kalınlık) testi

Nano bor karbür ve kontrol kompozitlerin çözgü ve atkı yönü katarası basma (kalınlık) testi, UTEST Material Testing Devices (Model: UTM-3000, İstanbul, TR) test cihazında [246], 1000 kN yük hücresine sahip ve ASTM D695-10 standardına dayalı olarak yapılmıştır [242]. Test hızı test standardı göz önüne alınarak 1,3 mm/dakika olarak düzenlenmiştir. Numunelerin test boyutları, ASTM D695-10 standardı göz önüne alınmış ancak bu tez kapsamında geliştirilen kompozitin boyutlarına göre 37,83 mm (uzunluk) × 34 mm (en) × 27,35-27,53 mm (kalınlık) olarak belirlenmiştir. Şekil 2.20(a-c) da katarası basma (kalınlık) testi deneysel düzeneği görülmektedir. Her plaka için en az üç kompozit numune teste tabi tutulmuş ve sonuçların ortalaması alınmıştır. Katarası basma (kalınlık) dayanımı, en yüksek basınç yükünün numunenin ölçülen kesit alanına bölünmesiyle belirlenir. Bunun için aşağıdaki bağıntı (2.19) kullanılmıştır.

$$F_{cu} = \frac{F_{max}}{A} \dots\dots\dots(2.19)$$

Burada, F_{cu} katarası basma dayanımını (MPa) belirtir, F_{max} ise kopmadan önceki maksimum kuvveti (N) temsil eder ve A ise kesit alanını (mm²) ifade eder.



Şekil 2.20. (a) Basma cihazı, (b) Basma cihazında örneğin yerleştirildiği fikstürün yakından görünümü ve (c) Kontrol ve nano katkılı B₄C para-aramid/epoksi kompozit yapıların (8 katlı) katarası basma (kalınlık) testi işlemi için kesilerek hazırlanmış numuneler.

2.4.4. Dinamik balistik, düşük hızlı darbe, darbe sonrası basma testleri

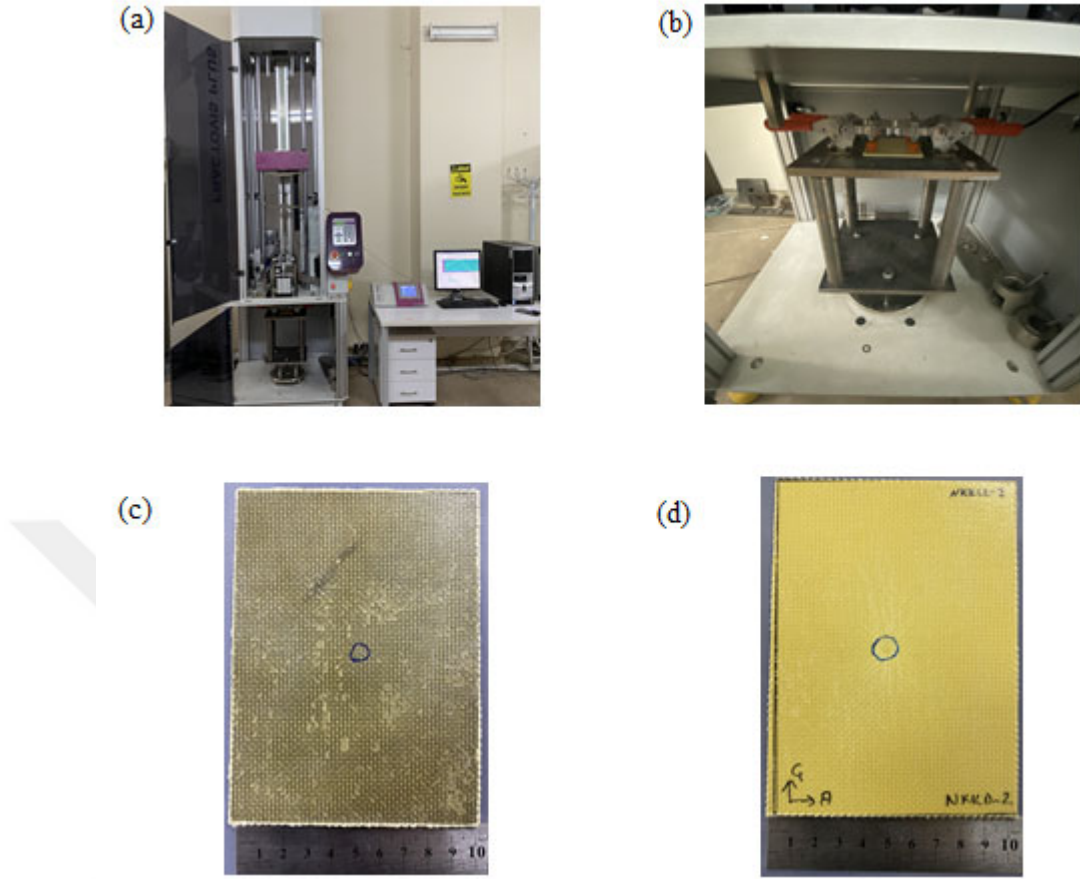
Nano bor karbür, grafen nano plaka katkılı ve nano hibrit p-aramid/epoksi ve kontrol kompozitler üzerinde yürütülen dinamik testler ki bunlar yüksek hızda balistik, düşük hızda düşürme ve düşürme sonrası basmayı içermekte olup nano kompozit yapıların yüksek ve düşük hızda mekanik performanslarının ve bozunma modlarının belirlenmesi amacı ile gerçekleştirilmiştir. Tablo 2.6 de dinamik testler ve kullanılan örneklerin boyutları ile bunlar hakkında açıklayıcı bilgiler verilmiştir. Balistik, düşürme ve CALVI testlerinden sonra bozulan örnekler görüntü yöntemleri ile bozunma modları belirlenerek gerekli yorumlar ve tanımlamalar yapılmıştır.

Tablo 2.6. Dinamik balistik, düşük hızlı darbe, darbe sonrası basma testleri için nano katkılı p-aramid/epoksi kompozitler.

Örnek kodu	Test yapılar	En x Boy x Kalınlık mm x mm x mm	Ağırlık (gram)	Katman sayısı	Nano malzeme ve oranları (%)
Düşürme (Düşük hız)					
NKKD	Kontrol p-aramid/epoksi kompozit	102 x 151 x 3,34	61,133	6	-
NKBD	B ₄ C/epoksi p-aramid nanokompozit	102 x 151 x 3,29	60,933	6	Nano hegzagonal bor karbür (nh-B ₄ C, %0,3)
NKGD	GNPs/epoksi p-aramid nanokompozit	102 x 151 x 3,30	60,700	6	Grafan nano plaka (GNPs, %0,3)
NBGD	B ₄ C/GNPs/epoksi p-aramid nanokompozit	103 x 151 x 3,29	61,566	6	Eşit oranda hibrit karışım (nh-B ₄ C, %0,3, GNPs, %0,3)
Düşürme sonrası basma (CALVI)					
NKKCL	Kontrol p-aramid/epoksi kompozit	102 x 151 x 3,34	61,133	6	-
NKBCL	B ₄ C/epoksi p-aramid nanokompozit	102 x 151 x 3,29	60,933	6	Nano hegzagonal bor karbür (nh-B ₄ C, %0,3)
NKGCL	GNPs/epoksi p-aramid nanokompozit	102 x 151 x 3,30	60,700	6	Grafan nano plaka (GNPs, %0,3)
NBGCL	B ₄ C/GNPs/epoksi p-aramid nanokompozit	103 x 151 x 3,29	61,566	6	Eşit oranda hibrit karışım (nh-B ₄ C, %0,3, GNPs, %0,3)
Balistik (Yüksek hız)					
NBK8	Kontrol p-aramid/epoksi nanobalistik	273.50 x 272.50 x 27.59	2451,10	48	-
NBB8	B ₄ C/epoksi p-aramid nanobalistik	271.70 x 268.00 x 28.02	2430,70	48	Nano hegzagonal bor karbür (nh-B ₄ C, %0,3)

2.4.4.1. Düşük hızlı darbe testi

Nano bor karbür, grafen nano plaka katkılı ve nano hibrit p-aramid/epoksi ve kontrol kompozitler üzerinde yapılan düşürme testleri Instron Inc. (Model: CEAST Fractovis Plus, MA, USA) cihazı ile nano kompozit örnekler düşük hızda ağırlık düşürme şeklinde uygulanmıştır. Bu çalışma için darbe hızı 2,672 m/s olarak sabitlenmiş ve darbenin toplam kütlesi 5,45 kg olarak belirlenmiş, böylece her darbe için 19,45 J'lik bir kinetik enerji elde edilmiştir. Ağırlık düşürme test cihazı, motorlu bir kaldırma rayı ile donatılmıştır. Toplanan veriler, her darbeden sonra yüksek hızlı veri toplayıcı (DAS 16000) kullanılarak depolanmış ve darbe aracı orijinal başlangıç yüksekliğine (0,364 m) geri döndürülmüştür. Bu teknik kullanılarak, darbe hızı ve nihayetinde etkilenen enerji tutarlı bir şekilde elde edilmiştir. Şekil 2.21(a-d) de ağırlık düşürme cihazı, fıkstür ve örneklerle birlikte görülmektedir. Ayrıca, örnek tutucu, her seferinde darbe aracının hedefi aynı noktada vurmasını sağlamak için test cihazının çerçevesine rijit bir şekilde bağlanmıştır. Bu çalışma için seçilen darbe çubuğu, 19 mm çapında ve yarıküresel burunlu, yuvarlak geometridedir (Şekil 2.21b). Darbe çubuğunun deformasyon işi göz ardı edilmiştir. 102 mm (genişlik) x 150 mm (uzunluk) x 3.29-3.34 mm (kalınlık) boyutlarında dikdörtgen kompozit panel, örneğin kaymasını önlemek amacıyla rijit bir tabana yerleştirilerek kısıpça sabitlenmiştir (Şekil 2.21b) [247]. Kompozit örnek paneli üzerinde yapılan düşük hızda darbe testi, ASTM D7136/D7136M-07'ye dayalı olarak gerçekleştirilmiştir [248].



Şekil 2.21. (a) Ağırlık düşürme testi cihazı. (b) Ağırlık düşürme testinin uygulandığı fikstür ve numune bölgesi. (c) Ağırlık düşürme testinin uygulandığı nano B₄C katkılı p-aramid/epoksi kompozit yapı. (d) Ağırlık düşürme testinin uygulandığı p-aramid/epoksi kompozit yapı (kontrol).

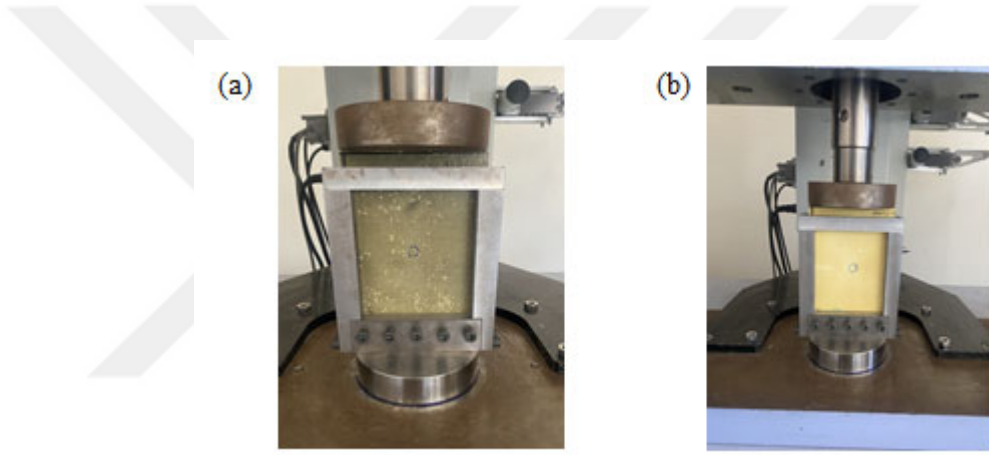
2.4.4.2. Düşük hızda darbe sonrası basma (CALVI) testi

Nano bor karbür, grafen nano plaka katkılı ve nano hibrit p-aramid/epoksi ve kontrol kompozitler üzerinde yapılan düşük hızda darbe sonrası testler (CALVI), düşürme yükü uygulanmış örnekler üzerinde, Shimadzu AG-XD 50 (JP) test makinesi kullanılarak ve Trapezium® veri toplama yazılımı ile ASTM D7137/D7137M-12 [249] standardına göre yapılmıştır. CALVI testi hızı 5,45 mm/dakika olarak belirlenmiştir. Numune boyutları 102 mm (genişlik) x 150 mm (uzunluk) x 3.29-3.34 mm (kalınlık) şeklindedir. ASTM D7137'ye göre Erciyes Üniversitesi, Tekstil Mühendisliği Bölümünde tasarlanan CALVI aparatı ile yapılmıştır. Şekil 2.22(a-b) de CALVI testi için fikstür ile Shimadzu AG-XD 50 (Japonya) test cihazını göstermektedir. Örnekler, sıkıştırma sırasında burkulmayı önlemek için alt kenardan ve iki taraftan tutturulmuştur. CALVI testleri standart

laboratuvar atmosferinde, $23 \pm 2^\circ\text{C}$ sıcaklık ve $\%50 \pm 10$ nem oranı altında yapılmıştır. Nihai sıkıştırma mukavemeti, aşağıdaki bağıntı (2.20) kullanılarak bulunmuştur [249].

$$F_{CAI} = \frac{P_{max}}{A} = \frac{P_{max}}{h \times w} \dots\dots\dots(2.20)$$

F_{CAI} ağırlık düşürme sonrası basma dayanımı (MPa), P_{max} kopmadan önceki maksimum kuvvet (N), A kesit alanı (mm^2), h örnek kalınlığı (mm) ve w , örnek genişliği (mm) olarak tanımlanmıştır.

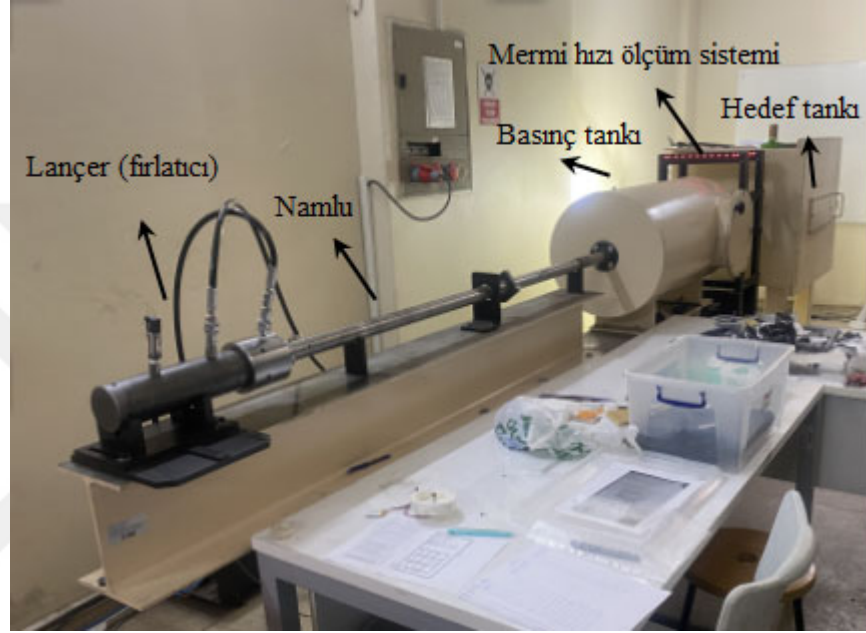


Şekil 2.22. (a) Fikstüre yerleştirilmiş, düşürme sonrası basma testinin uygulanacağı nano katkıli kompozit yapı. (b) Fikstüre yerleştirilmiş, düşürme sonrası basma testinin uygulanacağı kompozit yapı (kontrol) (Dijital fotoğraf).

2.4.4.3. Balistik test

Nano bor karbür katkıli p-aramid/epoksi ve kontrol kompozitler üzerinde yapılan parçacık tesirli mermi (FSP) atışları Erciyes Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Balistik Laboratuvarında tek kademeli gaz silahı sistemi kullanılarak yapılmıştır. Gaz silahları, genellikle laboratuvar ortamında balistik testler için tasarlanmış sistemlerdir ve temel olarak beş ana bölümden oluşur: Fırlatıcı (lançer), namlu, genişleme tankı, hız ölçüm sistemi ve hedef tankı. Bu sistemlerde, mermiyi hedefe yönlendirmek amacıyla farklı lançer tasarımları kullanılır. En yaygın tasarım ise çift diyaframlı lançer olarak bilinir. Bu tasarımda, iki diyafram merminin arka yüzü ile iki basınç haznesi arasında yer alır. Bu çalışmada, balistik testlerin gerçekleştirilmesi için helyum gazı kullanan ve çift diyaframlı lançer tasarımına sahip bir tek kademeli gaz silahı sistemi kullanılmıştır.

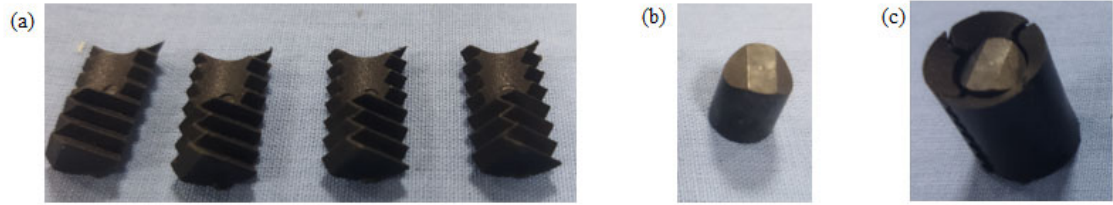
FSP'nin hareket ettiği namlu boyutları 12.7 mm (çap) x 1800 mm (uzunluk) olup basınçlı helyum gazı ile hedefe fırlatılmıştır. Şekil 2.23 de nano bor karbür katkılı p-aramid/epoksi ve kontrol kompozitler üzerinde yapılan parçacık tesirli mermi (FSP) atışları için kullanılan tek kademeli gaz silah sistemi görülmektedir.



Şekil 2.23. Nano bor karbür katkılı p-aramid/epoksi ve kontrol kompozitler üzerinde yapılan parçacık tesirli mermi (FSP) atışları için kullanılan tek kademeli gaz silah sistemi.

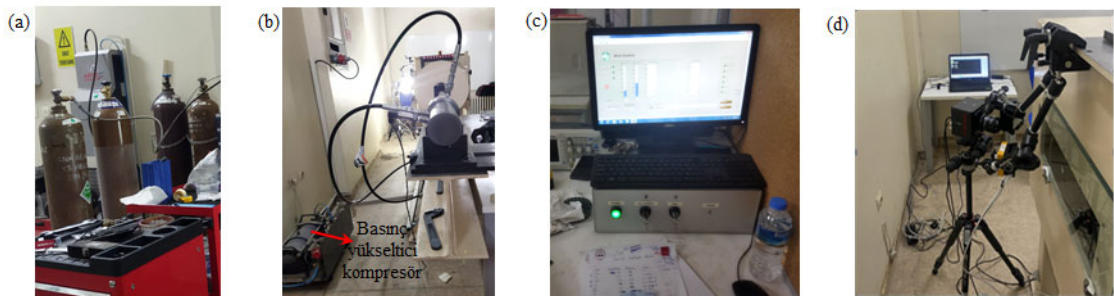
Balistik testte, parçacık tesirli mermi (Fragment Simulating Projectile, FSP) kullanılmıştır. Bu tür mermiler, balistik testlerde zırh malzemelerinin veya koruyucu yapıların parçacık etkisine karşı dayanımını değerlendirmek için kullanılmaktadır. Genellikle standart testlerde, özellikle askeri ve savunma sanayinde, şarapnel ve yüksek hızlı parçacık etkisini simüle etmek amacıyla göz önüne alınır. Parçacık tesirli mermi (FSP) yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çelikler sınıfına giren nikel-krom-molibden alaşımlı sertleştirilmiş (AISI 4340H) malzemeden yapılmıştır. FSP nin sertlik (RC) değeri 35-55 HRC, çekme dayanımı 1200-1800 MPa aralığında değişmekte olup zırh delici etkilere sahiptir. Hedefle temas ettiğinde parçacıkta gerçekleşen kalıcı şekil değişimleri ihmal edilebilecek seviyededir. FSP'nin ağırlığı 2,866 gram olup boyutları 7.51 mm (çap) x 8,50 mm (uzunluk) ve konik uç geometrisine sahiptir (0,3 caliber). FSP nin özellikleri

ve balistik testler NATO STANAG 2920 [250] and MIL-DTL-46593B(MR) [251] standartları göz önüne alınarak nano balistik yapılar üzerinde yürütülmüştür. Şekil 2.24(a-c) de kapsül parçaları, parçacık tesirli mermi (FSP) ve kapsül içerisinde FSP (sabot) görülmektedir.



Şekil 2.24. (a) Kapsül parçaları (b) Parçacık tesirli mermi (FSP) (c) Kapsül içerisinde FSP (sabot)

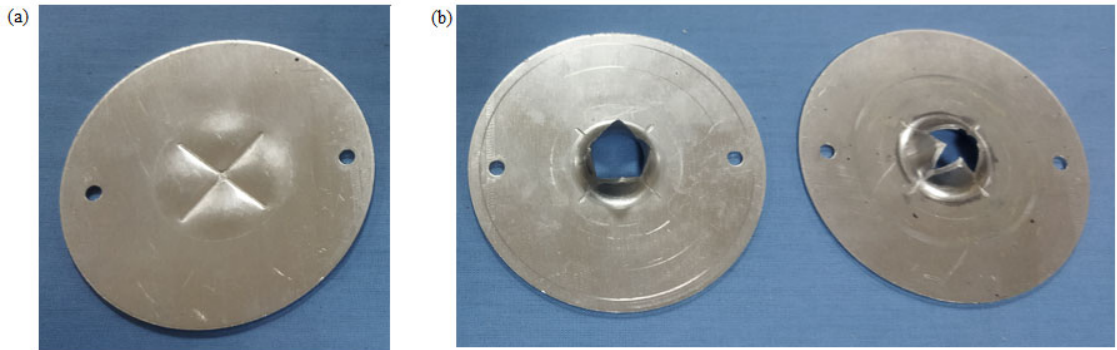
Mermiyi fırlatmada kullanılacak gazlar arasında helyum (He), hidrojen (H) ve nitrojen (N) öne sürülmekte olup performans açısından hidrojen gazı göz önüne alınırsa kullanım esnasındaki güvenlik sorunları nedeniyle kullanımı sınırlıdır. Bunun yerine helyum gazı tercih edilmektedir. Ateşleme hazırlıkları esnasında basınç yetersizliğinde devreye giren basınç yükseltici kompresör kullanılmaktadır. Sistemi ateşleme ve hız ölçüm sistemi için bilgisayar destekli program dahilinde kontrollü ve istenilen hızla atış yapılması hedeflenmiştir [252]. Hız ölçüm sistemi (kronoğraf) merminin hedefe giriş hızını ölçerken, merminin hedefi delip çıkması durumunda mermi çıkış hızı yüksek hızlı kamera vasıtası ile ölçülmektedir. Şekil 2.25(a-d)'de balistik atış testi için kullanılan helyum gazı tüpleri, basınç yetersizliğinde devreye giren basınç yükseltici kompresör, bilgisayarlı ateşleme ve hız ölçüm sistemi ile FSP çıkış hızı ölçümü için kullanılan bilgisayarlı yüksek hızlı kamera görülmektedir.



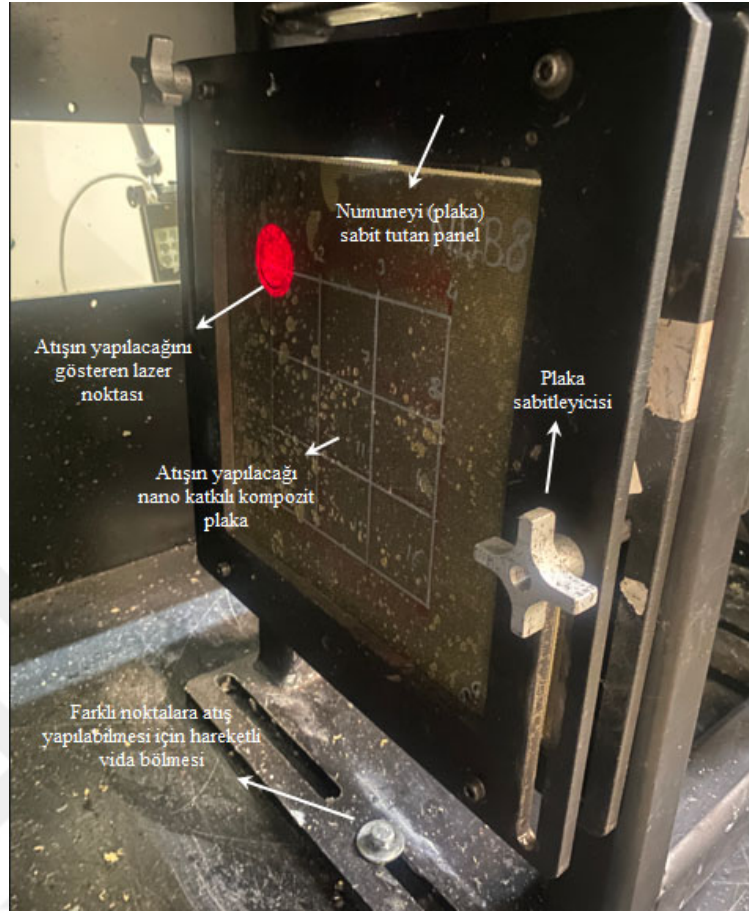
Şekil 2.25. (a) Balistik atış testi için kullanılan helyum gazı tüpleri (b) Basınç yetersizliğinde devreye giren basınç yükseltici kompresör (c) Bilgisayarlı ateşleme ve hız ölçüm sistemi (d) FSP çıkış hızı ölçümü için kullanılan bilgisayarlı yüksek hızlı kamera (Dijital fotoğraf).

Çift diyaframlı lançer (fırlatıcı), helyum gaz basıncını kullanarak FSP'yi fırlatan bir sistemdir. Sistemde, gaz, iki diyaframın arasında sıkıştırılır. İlk diyafram, basınçla esner ve bir kuvvet uygular. Bu kuvvet, ikinci diyaframı harekete geçirir ve FSP'nin fırlatılması gerçekleşir. Çift diyafram kullanılması, tek diyaframlı sistemlere göre daha yüksek basınç oluşturur ve bu sayede daha kontrollü ve güçlü bir fırlatma işlemi gerçekleşir. İki diyaframın senkronize bir şekilde çalışması, gazın verimli bir şekilde FSP'ye iletilmesini sağlar, böylece fırlatma daha düzenli gerçekleşir. Bu tip sistemler, genellikle balistik testler veya mühimmat fırlatma gibi yüksek hız gerektiren uygulamalarda kullanılır [253]. Şekil 2.26(a-b) de atışlarda kullanılan çentikli diyafram ve atış sonrası basınç altında kalıcı şekil değişime uğramış çift diyaframlar görülmektedir.

Hazırlanan nano balistik kompozit örnekler hedef fikstürüne köşe ve yanal konumlardan dört noktadan tespit edilmiştir. Nano balistik örnek boyutları 273,50 mm (en) x 272,50 mm (boy) x 27,59-28,02 mm (kalınlık) olarak fikstürde atışlar için hazır hale getirilmiştir. Çoklu atışlar hem nano balistik kompozit zırha (10 adet) ve hem de kontrol (13 adet) kompozit zırhına yapılmıştır. Çoklu atış hızları 475 m/s - 1015 m/s aralığında hedefler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.27'de atıştan önce atış tankı içerisinde atış fikstürü ve nano balistik kompozit malzeme görülmektedir.



Şekil 2.26. (a) Atışlarda kullanılan çentikli diyafram (b) Atış sonrası basınç altında kullanılan çift diyaframlar.

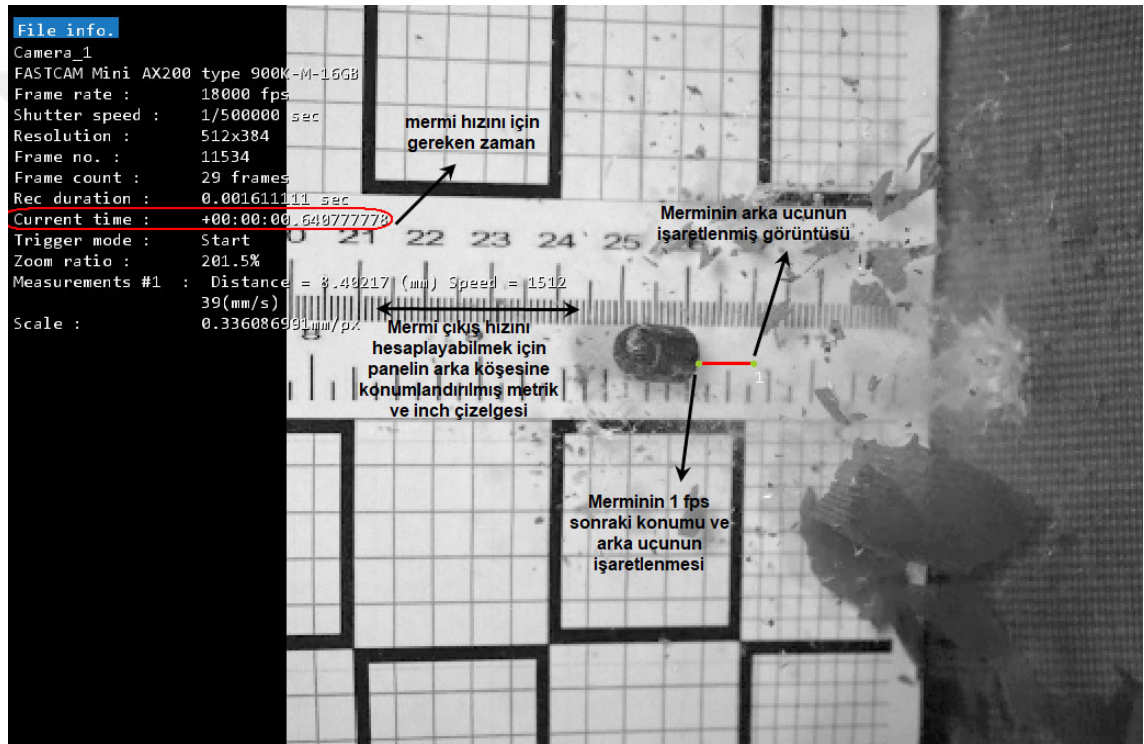


Şekil 2.27. Atıştan önce atış tankı içerisinde atış fıkstürü ve nano balistik kompozit malzeme.

Balistik testlerde, FSP nin hedef içindeki ve hedefle birlikte hareketi ve/veya hedefi delip çıkma görüntüleri FASTCAM Mini AX200, 6.400 fps'de 1024 x 1024 piksel (Model: Mini AX200, Photron Inc., CA. USA), maksimum kare hızı: 900.000 fps (Mini AX200 tipi 900K-M-16GB), Photron FASTCAM Viewer yazılımı (PFV4) üzerinden gerçekleştirilmiştir. Balistik testlerdeki çıkış hızını hesaplamak için, saniyede 900000 kare çekme (fps) özelliğine sahip yüksek hızlı kamera yazılımı ve referans çizelge cetveli kullanılmıştır [254]. Balistik atış görüntüleri, yüksek hızlı kamera ile örneğin 33 μ s zaman aralıklarıyla kaydedilmiştir. FSP çıkış hızı (artık hız) hesaplaması yapılmadan önce, referans çizelgesindeki cetvel kullanılarak kalibrasyon yapılmıştır. Kalibrasyon işlemi sonrasında, görüntüler arasındaki mesafe ve zaman bilgileri bilindiğinden, çıkış hızları bağıntı (2.21) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$V_r = \frac{x}{t_2 - t_1} \dots\dots\dots(2.21)$$

Burada, V_r etki sonrası kalan mermi hızını, x görüntüler arasındaki mesafeyi ve t_2-t_1 ise geçen zamanı ifade etmektedir. Şekil 2.28 de FSP nin hedefi delip çıkışını gösteren foto ve burada referans çizelge cetveli yardımı ile çıkış hızı hesaplamaları ile birlikte kameranın hesapladığı örneğin süre, mesafe gibi çıktılar verilmiştir.



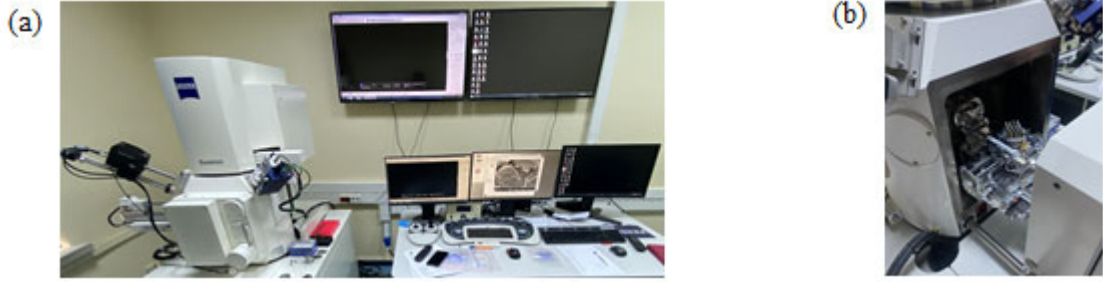
Şekil 2.28. FSP nin hedefi delip çıkışını gösteren foto ve burada referans çizelge cetveli yardımı ile çıkış hızı hesaplamaları ile birlikte kameranın hesapladığı örneğin süre, mesafe gibi çıktılar.

2.4.5. Morfolojik testler

2.4.5.1. Alan emisyonlu taramalı elektron mikroskop (FESEM)

Geliştirilen nanokaplama örneklerin yüzey özellikleri, standart laboratuvar koşulları altında bir alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FESEM) (ZEISS GeminiSEM500, Almanya) kullanılarak analiz edilmiştir. Ayrıca, FESEM ile entegre edilen Enerji Dağılımlı X-ışını (EDX) Analizi, nano-kaplı p-aramid kumaş yapısının

kimyasal bileşimini ve yoğunluğunu incelemek için kullanılmıştır. Şekil 2.29(a-b)'de FESEM cihazı ve görüntü işleme odası ile cihazının numune giriş bölümü görülmektedir.

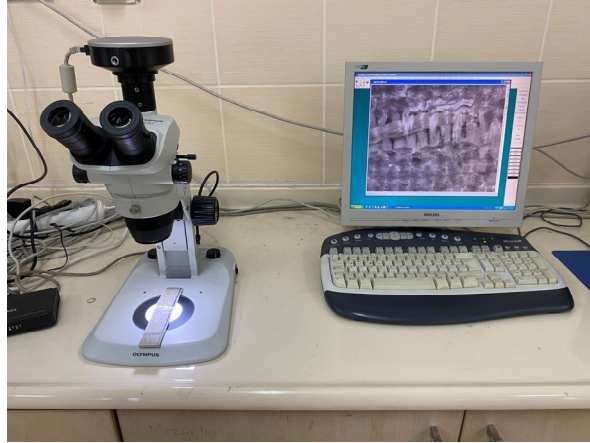


Şekil 2.29. (a) FESEM cihazı ve görüntü işleme alanı (b) FESEM cihazının numune giriş bölümü.

2.4.5.2 Optik mikroskop (Işık mikroskop)

Optik mikroskop (Olympus SZ61, Bs200DOC dijital görüntü analiz yazılımı ile donatılmış, Japonya), soft p-aramid kumaşların, hasarsız ve hasarlı rijit kompozitlerin düşük büyütme ($\times 6.7$) görüntülerini elde etmek için kullanılmıştır. Rijit kompozitlerin her örneğin ön ve arka yüzeylerindeki hasarlı alanları, ImageJ (NIH Image, Public Domain BSD-2, Bethesda, Maryland) görüntü analiz yazılımı ile ölçülmüştür. Bu yazılım, 1997 yılında Ulusal Sağlık Enstitüleri (NIH) Image platform versiyonu olarak geliştirilmiştir [255]. Şekil 2.30 da optik mikroskop ve numune ile birlikte bilgisayar görüntüsü verilmiştir.

Ayrıca, bir dijital kamera (Nikon D3000 10.2MP Dijital SLR Kamera, 18–55 mm f/3.5–5.6G AF-S DX VR Nikkor Zoom Lens, Japonya), tüm örneklerin ve süreçlerin makro ölçekli görüntülerini belirlemek için kullanılmıştır. Ayrıca, bazı makro ölçekli hasar görmüş balistik plakalar ve kompozit yapılar, Newman dijital kaliper (ölçüm uzunluğu: 0-150 mm ve hassasiyet: 0.01 mm, Çin) ile ölçülmüştür.



Şekil 2.30. Optik mikroskop ve numune ile bilgisayardaki görüntüsü.

2.4.6. Analitik karakterizasyon testler

2.4.6.1. Fourier dönüşüm kızılötesi spektroskopisi (FTIR)

Fourier dönüşüm kızılötesi spektroskopisi (FTIR, Perkin Elmer® Spectrum 400, ABD), para-aramid kumaş yapılarındaki nano kaplama değişikliklerini tanımlamak amacıyla absorplama modunda infrared spektrumları elde etmek için kullanılmıştır. Mevcut çalışmada, $4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$ dalgaboyu aralığı ve 2 cm^{-1} karakteristik çözünürlük kullanılmıştır. Şekil 2.31’de FTIR cihazı ve örnek ölçümlerin bilgisayarlı ortamda Exel formatında verilerin ileriki işlemler için depolanması görülmektedir.



Şekil 2.31. FTIR cihazı ve örnek ölçümlerin bilgisayarlı ortamda Exel formatında verilerin ileriki işlemler için depolanması.

2.4.6.2. Raman spektroskopisi (RAMAN)

Nano kaplamalı p-aramid kumaş yapıları ve moleküler bileşimler, 532 nm lazer dalga boyuna sahip bir Raman görüntüleme mikroskobu–WITec (alpha300, WiTec GmbH, Ulm, Almanya) kullanılarak analiz edilmiştir. Şekil 2.32 de RAMAN spektroskopisi cihazı görülmektedir.



Şekil 2.32. RAMAN spektroskopisi cihazı.

2.4.6.3. Termogravimetrik analiz/Diferansiyel termal analiz (TGA/DTA)

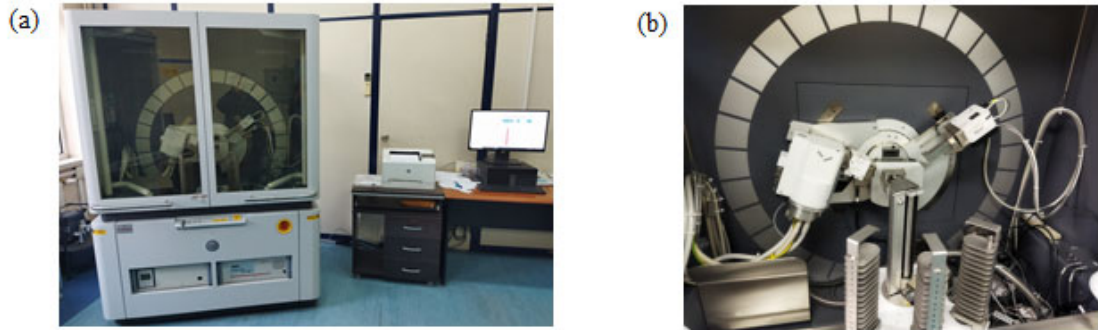
Nano kaplamalı para-aramid yapıların termal kütle analizi (TGA), bir termogravimetrik analiz cihazı (Hitachi STA 7300) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yaklaşık 3-4 miligram (mg) ağırlığındaki bir örnek, alumina bir kap içinde yerleştirilmiş ve 25°C'den 1000°C'ye kadar, dakika başına sabit 10°C'lik bir hızla ısıtılan kontrollü bir ısınma programına tabi tutulmuştur. Analiz, 1.5 cm³ (cc)/dakika akış hızında düzenlenen bir azot (N₂) gazı atmosferi altında yapılmıştır. Şekil 2.33 de TGA/DTA cihazı bilgisayar ekranı ile birlikte görülmektedir [256].



Şekil 2.33. TGA/DTA cihazı.

2.4.6.4. X-ışını difraksiyonu (XRD)

X-ışını difraksiyon (XRD) analizi, Malvern Panalytical (Model: Empyrean, İngiltere) X-ışını difraktometresi kullanılarak gerçekleştirilmiş ve nano kaplamalı örneklerin $0-40^\circ$ 2θ sağılma aralığındaki X-ışını difraksiyon profilleri elde edilmiştir. Şekil 2.34. de XRD cihazı ve bilgisayarlı ekran görüntüsü ile XRD cihazının numune tutucu iç bölümü görölmektedir.



Şekil 2.34. (a) XRD cihazı ve bilgisayarlı ekran görüntüsü ve (b) XRD cihazının numune tutucu iç bölümü.

2.4.7. Diğer testler

Bu başlık altında nano katkılı, hibrit nano ve kontrol para-aramid/epoksi kompozitler üzerinde yoğunluk, lif ve matriks hacimleri ve ayrıca kumaş spesifikasyon testleri yapılmıştır. Tablo 2.7’de nano katkılı p-aramid/epoksi kompozitler üzerinde yapılan

yoğunluk ve lif hacmi testleri, yapıların kodları, tanımları, boyutları, ağırlıkları, katman sayıları ve nano oranları üzerinden verilmiştir.

Tablo 2.7. Yoğunluk ve lif hacmi testleri için nano katkılı p-aramid/epoksi kompozitler.

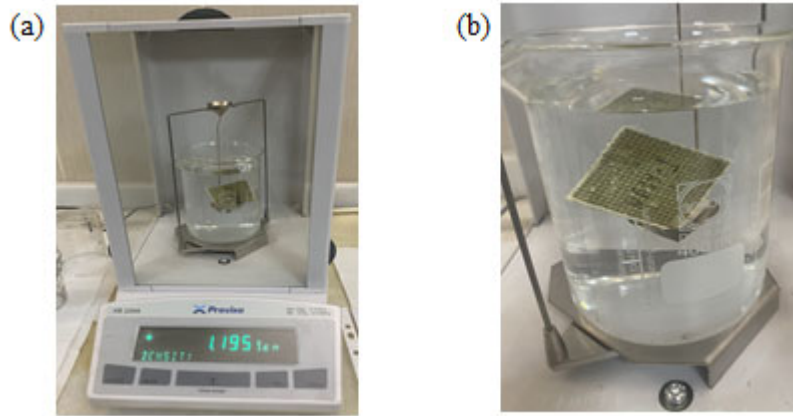
Numune kodu	Yapılar	En x Boy x Kalınlık mm x mm x mm	Plaka ağırlığı (gram)	Katman sayısı	Nano malzeme ve oranı (%)
Yoğunluk					
NKKY	Kontrol p-aramid/epoksi kompozit	31 x 32 x 3,24	3,652	6	-
NKBY	B ₄ C/epoksi p-aramid nanokompozit	31 x 31 x 3,39	3,860	6	Nano hegzagonal Bor karbür (nh-B ₄ C, %0,3)
NKGY	GNPs/epoksi p-aramid nanokompozit	32 x 32 x 3,44	4,000	6	Nano grafen plakalar (GNPs, %0,3)
NBGY	B ₄ C/GNPs/epoksi p-aramid nanokompozit	32 x 32 x 3,40	4,006	6	Eşit oranda hibrit karışım (nh-B ₄ C, %0,3, GNPs, %0,3)
Lif hacmi					
NKKV	Kontrol p-aramid/epoksi kompozit	31 x 32 x 3,15 31 x 31 x 3,21	3,622 3,906	6	-
NKBV	B ₄ C/epoksi p-aramid nanokompozit	31 x 31 x 3,21	3,906	6	Nano hegzagonal Bor karbür (nh-B ₄ C, %0,3)
NKGV	GNPs/epoksi p-aramid nanokompozit	32 x 32 x 3,42	3,988	6	Nano grafen plakalar (GNPs, %0,3)
NBGV	B ₄ C/GNPs/epoksi p-aramid nanokompozit	32 x 32 x 3,44	4,058	6	Eşit oranda hibrit karışım (nh-B ₄ C, %0,3, GNPs, %0,3)

2.4.7.1. Yoğunluk testi

Nano bor karbür, grafen nano plaka ve hibrit nano katkılı ve kontrol para-aramid/epoksi kompozitlerin yoğunlukları, ASTM D792-91 standardına göre gerçekleştirilmiştir [257]. Deney yöntemine göre yoğunluğu ölçülecek numuneler 23 ± 2°C'de ve %50 ± %5 bağıl nemde 40 saat koşullandırılarak yapıldı. Test numunesinin tamamının saf suyun içinde kalabilmesi için cam behere yeterli miktarda saf su dolduruldu ve test standardına göre 23±2°C olması gereken beherin içindeki su sıcaklığı ölçülerek kaydedildi. Yoğunluğu ASTM D792-08'e göre ölçmek için hassas bir terazi (Precisa XB 220A, İsviçre; doğruluk = 0.0001 g) kullanıldı. Test numunesinin ağırlıkları ilk önce laboratuvar koşullarında ve sonra da suda ölçülmüştür. Numune tutucunun ağırlığı (w) tüm numuneler için aynı şekilde belirlenmiştir. Kompozit panelin yoğunluk bağıntısı (2.22) kullanılarak hesaplanmıştır. Test numunesinin suyun içindeki ağırlığı ölçülürken kompozit yapıdaki boşluklara suyun girmemesine dikkat edilmiştir. Kompozit yapıdaki boşluklara su dolmaması için test numunesinin suyun içindeki ağırlığı 1 dakika içinde ölçülmüştür. Şekil 2. 35(a-b)'de yoğunluk ölçme cihazı ve test haznesi test esnasında görülmektedir. Yoğunluk bağıntısı (2.22) aşağıda verilmiştir.

$$\text{Yoğunluk (g/cm}^3\text{)} = \rho = \frac{a}{a+w-b} \dots\dots\dots (2.22)$$

Burada, ρ kompozit yoğunluğu (g/cm^3), a test numunesinin havadaki ağırlığı (gram), b suya tamamen daldırılmış test numunesinin ve su içerisine daldırılmış numune tutucu telin görünen ağırlığı (gram), w suyun içerisine daldırılmış numune tutucu telin görünen ağırlığıdır (gram).

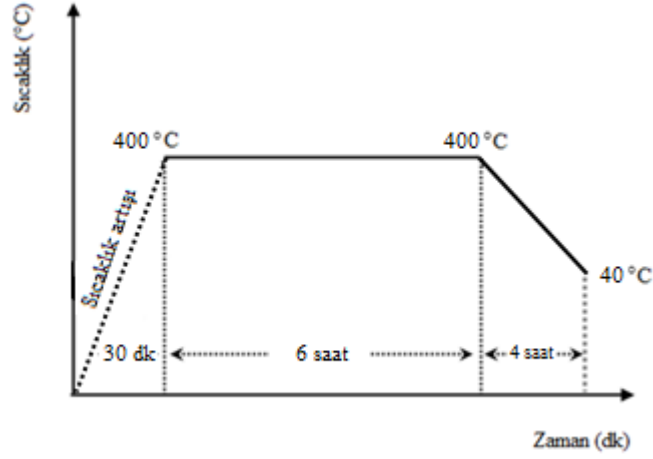


Şekil 2.35. (a) Nano kompozitler üzerinde deneysel yoğunluk ölçümü için kullanılan cihaz ve (b) Cihazın su dolu iç bölgesi test esnasında görülmektedir.

2.4.7.2. Kompozit lif hacmi testleri

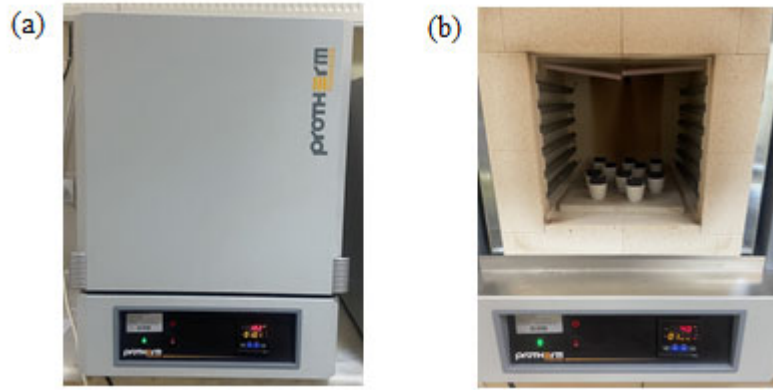
Nano bor karbür, grafen nano plaka ve hibrit nano katkılı ve kontrol para-aramid/epoksi kompozitlerin lif hacmi ve matris hacimleri hem ağırlık ve hemde hacimsel olarak ve ayrıca boşluk oranları sırasıyla ASTM D3171-99 [258] ve ASTM D2734-91 [259] standartları kullanılarak ölçülmüştür. Kompozit malzemedeki lif hacimlerinin ölçülmesi laboratuvar koşullarında, sıcaklık, $23 \pm 3^\circ\text{C}$ ve $\%50 \pm 10$ bağıl nem, de gerçekleştirilmiştir. Test yöntemine göre yüksek sıcaklıktaki ateşleme, polimer matriksin (epoksi) kompozit plakalardan buharlaşması ve kumaş yapısındaki filament demetlerinin (bükümsüz iplik) etkilenmeden kalması esasına dayanır. Burada kül fırınının sıcaklığı ve işlem süresi, doğru sonuçlar elde etmek için kritik parametrelerdir. Bileşen malzemelerin bozunma sıcaklıklarına göre uygun bir sıcaklık test standartları göz önüne alınarak seçilmiştir. Epoksi reçinenin bozunma sıcaklığı 300°C - 350°C iken, para-aramid kumaşın bozunma (degradation) 450°C - 500°C ve nh-B₄C ile GNPs malzemeler 1000°C 'nin üzerinde bozunmazlar. Bu durumda, sıcaklık 400°C ve işlem süresi 5 saat olarak belirlenmiştir.

Kompozit malzemelerdeki bileşen içeriklerini belirlemek için sıcaklık-zaman grafiği Şekil 2.36'de gösterilmiştir.



Şekil 2.36. Kompozit malzemelerdeki bileşen içeriklerini belirlemek için uygulanan sıcaklık-zaman grafiği.

Test numunelerinin başlangıç ağırlıkları hassas bir teraziyle tartılmıştır (Shimadzu AUX 320, doğruluk:0.1mg, Japonya). Tartılan numuneler önceden tartılmış porselen fincanlara yerleştirilerek kül fırınının yanma haznesine yerleştirilmiştir (Protherm Furnaces, Model: PLF 110/30, Türkiye). Kül fırında sıcaklık 30 dakikada 400°C'ye çıkmıştır, 400 °C'de 5 saat numuneler bekletilmiştir ve daha sonra sıcaklık 40°C'ye ayarlanmıştır. Fırının sıcaklığı yaklaşık 3 saatte 40°C'ye gelerek yakma işlemi tamamlanmıştır. Yakma işlemi sonunda epoksi buharlaşarak kompozit malzemeden uzaklaştırılmış ve geriye para-aramid kumaşla nano malzemeler kalmıştır. Kalan kısım porselen fincanla birlikte desikatöre konarak koşullandırılmış ve 24 saat sonra ağırlıkları ölçülmüştür. Şekil 2.37(a-b)'de kül fırını ve lif hacim oranlarının belirlenmesinde kullanılan test numuneleri gösterilmiştir. Ayrıca, her numuneden beş tekrarlı hesaplama yapılmıştır.



Şekil 2.37. (a) Lif hacmi ölçümü için kullanılan kül fırını ve (b) Yakma işlemi sonrası kül fırının iç haznesi.

Kompozit yapıların hacim oranlarını ve boşluk miktarlarını belirlemek için aşağıdaki bağıntılar (2.23-2.30) kullanılarak bileşen içeriklerinin ağırlık ve hacim esaslı lif oranları ve boşluk miktarları hesaplanmıştır.

$$Wf = \frac{(M_f - M_n)}{M_i} \times 100 \dots\dots\dots(2.23)$$

$$Vf = \frac{(M_f - M_n)}{M_i} \times 100 \times \frac{P_c}{P_f} \dots\dots\dots(2.24)$$

$$Wm = \frac{(M_i - M_f)}{M_i} \times 100 \dots\dots\dots(2.25)$$

$$Vm = \frac{(M_i - M_f)}{M_i} \times \frac{P_c}{P_m} \times 100 \dots\dots\dots(2.26)$$

$$M_{nk} = (M_i - M_f) \times \text{ağırlıkça \% nano oranı} \dots\dots\dots(2.27)$$

$$M_n = \frac{M_n}{M_i} \times 100 \dots\dots\dots(2.28)$$

$$V_n = \frac{M_n}{M_i} \times 100 \times \frac{P_c}{P_n} \dots\dots\dots(2.29)$$

$$V_v = 100 - (V_f + V_m + V_n) \dots\dots\dots(2.30)$$

Burada, M_i test örneğinin ilk ağırlığı (gram), M_f test örneğinin yakma işleminden sonra kalan ağırlığı (g), M_{nk} kompozitteki nano malzeme ağırlığı (B4C, GNPs, gram), P_c test örneğinin yoğunluğu (g/cm^3), P_f lifin yoğunluğu (g/cm^3), P_m epoksinin yoğunluğu (g/cm^3), N_w epoksi matris içindeki ağırlıkça nano dolgu maddesi yüzdesi (%), P_n nano dolgu malzemesinin yoğunluğu (g/cm^3), W_f % ağırlık esaslı lif oranı, V_f % hacim esaslı lif oranı, W_m % ağırlık esaslı epoksi oranı, V_m % hacim esaslı epoksi oranı, M_n % ağırlık esaslı nano dolgu maddesi oranı, V_n % hacim esaslı nano dolgu maddesi oranı ve V_v % boşluk oranı olarak göz önüne alınmıştır.

2.4.7.3. Kumaş spesifikasyon testleri

Krimp ölçümü, ISO 7211-3 standardına göre Tautex dijital cihazı (James H. Heal Co., İngiltere) kullanılarak yapılmıştır [260]. Kumaş kalınlık ölçümü, ISO 1765 standardına göre R&B kumaş kalınlık test cihazı (James H. Heal Co., İngiltere) ile gerçekleştirilmiştir [261]. Kumaş birim alan ağırlığı ölçümü ise ISO 3801 standardı göz önüne alınarak yapılmıştır [262]. Kumaş çözgü ve atkı sıklıkları ise EN ISO 7211-2:2024 standardına göre optik mikroskopta ölçülmüştür [263]. Kumaş örgüsü ise bir mercek(lup) yardımıyla belirlenmiştir.

3. BÖLÜM

BULGULAR

3.1. Yoğunluk ve lif hacmi verileri

Nano bor karbür (NKB), grafen nano plaka katkılı (NKG) ve nano hibrit p-aramid/epoksi (NBG) ve kontrol (NKK) kompozitler üzerinde yapılan yoğunluk ve lif hacim verileri ortalama değerler üzerinden Tablo 3.1’de verilmiştir. Tablo 3.1 den görüleceği üzere ölçülen veriler hesaplanan ve ölçülen yoğunluklar(g/cm^3), p-aramid lif hacmi ağırlıkça ve hacimce, nano malzemeler ağırlıkça ve hacimce(%) ve boşluk oranları(%)’nı içermektedir.

Tablo 3.1. Nano katkılı para-aramid/epoksi kompozit yapıların ortalama yoğunluk ve lif hacim verileri.

Numune kodu	Hesaplanan yoğunluk (d_c , g/cm^3)	Ölçülen yoğunluk (d_m , g/cm^3)	Lif hacmi-ağırlıkça (V_{fw} , %)	Lif hacmi-hacimce (V_{fv} , %)	Nano malzeme-ağırlıkça (%)	Nano malzeme-hacimce (%)	Boşluk oranı (V_b , %)
Yoğunluk ve lif hacmi							
NKK	1,14	1,20	58,12	48,26	-	-	8,46
S. sapma	0,01	0,01	1,43	1,19	-	-	0,29
Cv(%)	0,67	0,71	2,46	2,46	-	-	3,44
NKB	1,18	1,20	55,50	45,86	0,13	1,60	8,51
S. sapma	0,02	0,01	0,95	0,78	0,01	0,03	0,19
Cv(%)	1,64	0,98	1,70	1,70	2,12	2,12	2,21
NKG	1,14	1,19	56,06	45,10	0,13	0,07	9,35
S. sapma	0,02	0,01	0,82	0,67	0,01	0,01	0,16
Cv(%)	1,56	0,82	1,45	1,45	1,85	1,85	1,72
NBG	1,15	1,20	53,87	44,57	0,13	0,14	8,08
S. sapma	0,01	0,01	0,82	0,68	0,01	0,01	0,16
Cv(%)	0,75	0,67	1,51	1,51	1,94	1,77	2,01

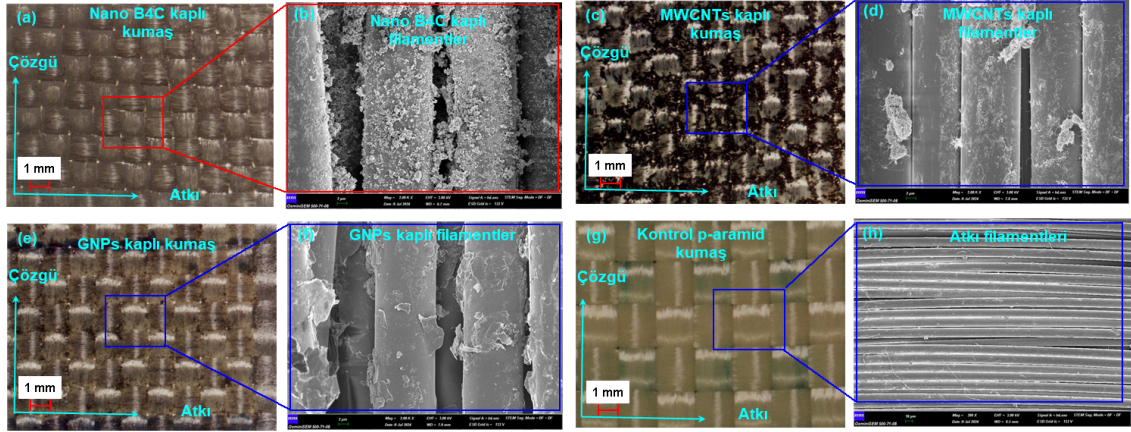
3.2. Kumaştan iplik çekme (Pull-out) verileri

3.2.1. Nano kaplama kumaş yapılar

Kumaştan iplik çekme verileri nano h-B₄C, MWCNTs ve GNPs nano kaplamalı p-aramid yapılar üzerinden elde edilmiştir. Elde edilen veriler malzemelerin yüzey morfoloj ile nano kaplı p-aramid kumaş yapısının kimyasal bileşimi ve konsantrasyonunu belirlemek amacıyla enerji dağılımlı X-ışını (EDX) analiz verileri, nano malzeme ve filamentsi yapı arasındaki bağ özelliklerini içeren veriler FTIR ve RAMAN üzerinden, nano kaplama p-aramid kumaş yapısının kristal yapıları ilgilendiren veriler XRD üzerinden, termal özellikler ve bunların bozulan ağırlıkları da TGA/DSC üzerinden belirlenmiştir. Ayrıca, nano kaplama p-aramid, CVD ve PECVD malzemelerin tekli ve çoklu kuvvet-yer değiştirme ve enerji sönümlleme verileri de bu kısımda verilmiştir.

3.2.1.1. Alan emisyonlu taramalı elektron mikroskop (FESEM) verileri

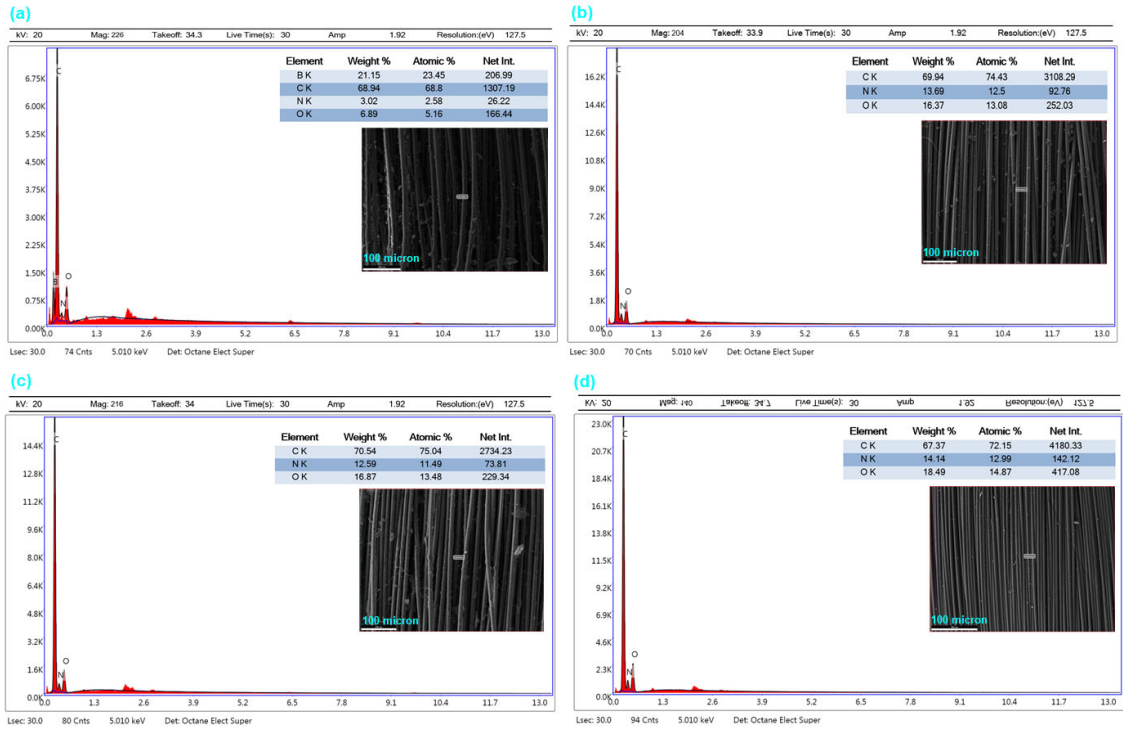
Nano h-B₄C, MWCNTs ve GNPs nano kaplamalı p-aramid kumaş yapıları Şekil 3.1(a-h)'de görülmektedir. Para-aramid kumaşların nano malzeme ile kaplanarak özellikle soft balistik uygulamalar için filament-filament sürtünmeleri artırılmak amacı ile geliştirilmiş ve sürtünme esaslı enerji sönümlleme özellikleri kazandırılmaya çalışılmıştır. Bu tez kapsamında geliştirilen ve “ardıl sıkıştırma yöntemi” (iterative compression method) olarak adlandırılan çeşitli nano kaplamalı p-aramid yapılar geliştirilerek filament-filament yüzeyleri ve kumaş forumlamadan kaynaklanan arayüzeyleri homojen kaplanıp birbirlerine tutunmaları sağlanmıştır.



Şekil 3.1. Nano kaplı p-aramid kumaş yapıları. (a) Nano B₄C kaplı kumaş (optik mikroskop, OP), (b) Nano B₄C kaplı kumaş (FESEM, ölçek: 2 µm), (c) MWCNTs kaplı kumaş (OP), (d) MWCNTs kaplı kumaş (FESEM, ölçek: 2 µm), (e) GNPs kaplı kumaş (OP), (f) GNPs kaplı kumaş (FESEM, ölçek: 2 µm), (g) kontrol kumaş yüzeyi (OP) ve (h) kontrol kumaş yüzeyi (FESEM, ölçek: 10 µm).

3.2.1.2. EDX verileri

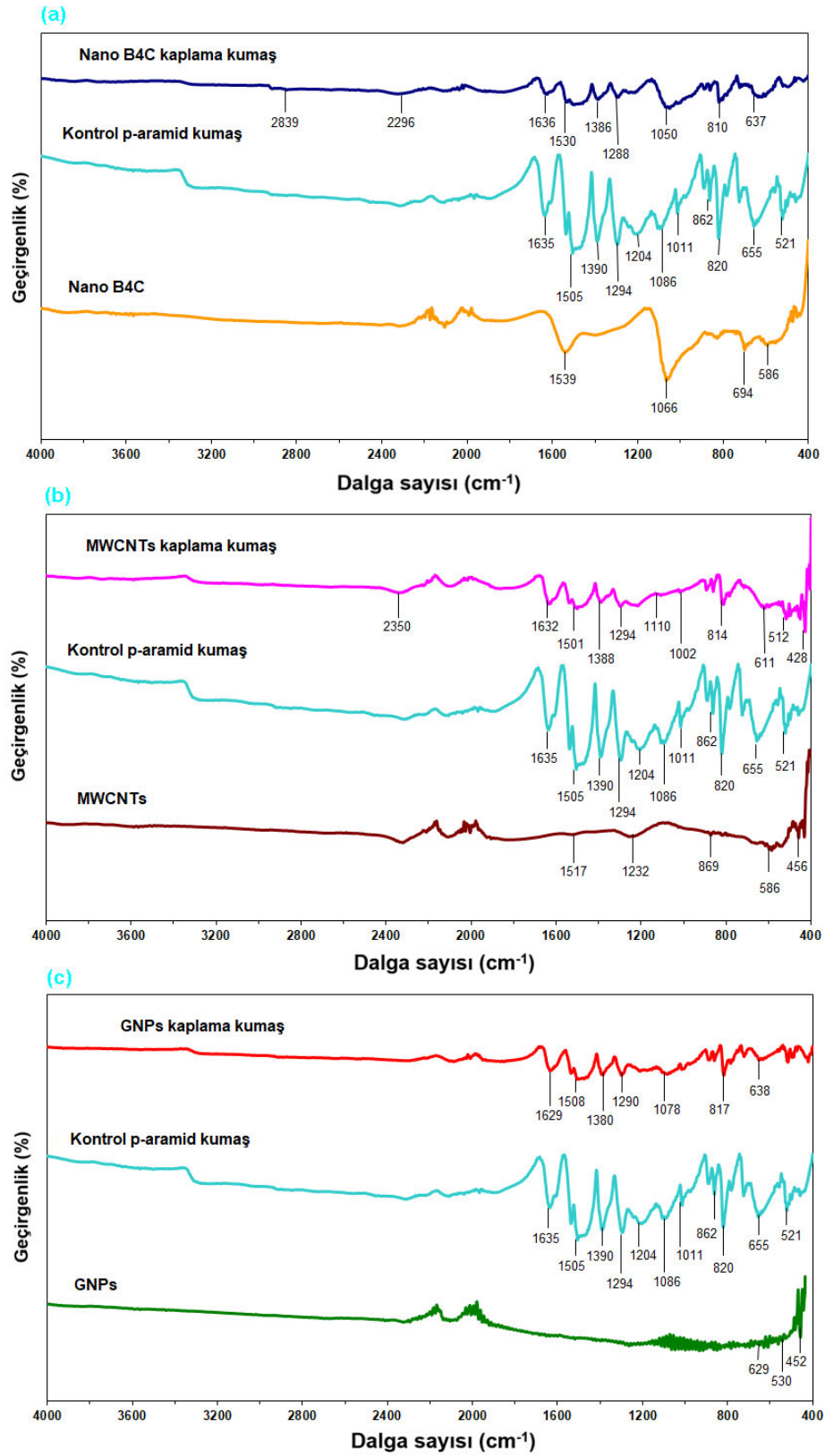
Nano h-B₄C, MWCNTs ve GNPs nano kaplamalı p-aramid kumaş yapıların enerji dağılımlı X-ışını (EDX) analiz verileri Şekil 3.2(a-d)'de görülmektedir. Nano kaplı p-aramid kumaş yapıların kimyasal bileşimi ve konsantrasyonu belirlenerek pull-out yükü altında statik ve kinetik sürtünme olaylarının açıklanmasında yardımcı olmuştur.



Şekil 3.2. Nano kaplı p-aramid kumaşların enerji dağılımlı X-ışını (EDX) analiz verileri. (a) Nano B₄C kaplama kumaş, (b) MWCNTs kaplama kumaş, (c) GNPs kaplama kumaş ve (d) Kontrol kumaş.

3.2.1.3. Fourier dönüşüm kızılötesi spektroskopisi (FTIR) verileri

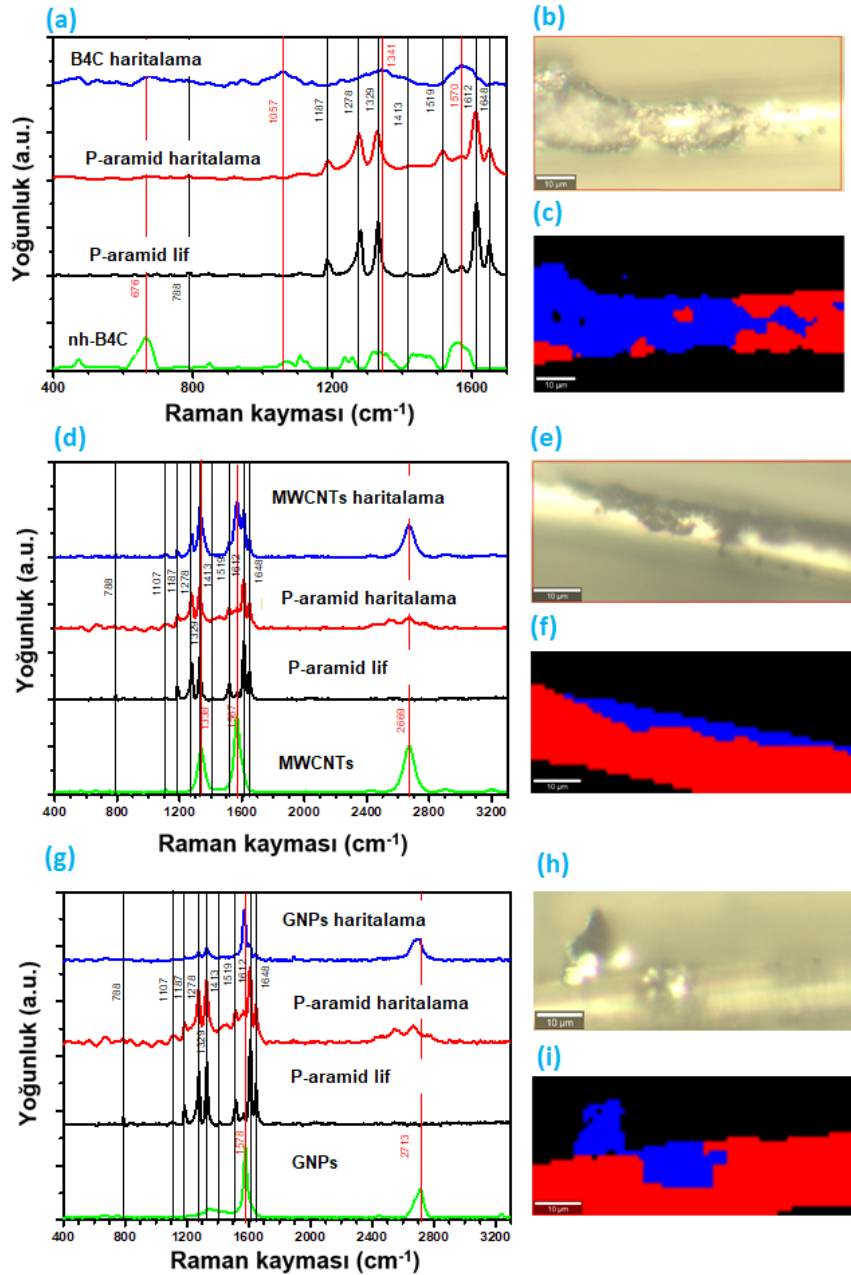
Nano h-B₄C, MWCNTs ve GNPs nano kaplamalı p-aramid kumaş yapıların fourier dönüşüm kızılötesi spektroskopisi (FTIR) verileri Şekil 3.3(a-c) de görülmektedir. Bu veriler nano malzemelerin filament yüzeyi yada kumaş yüzeyi ile olası yaptığı bağlar ki bunlar kimyasal yada fiziksel, hakkında bilgi edinmek ve olası enerji sönmleme prosesine katkısı ve davranış mekanizmalarının açığa çıkarılması amacı ile yapılmıştır.



Şekil 3.3. Fourier dönüşüm kızılötesi spektroskopisi verileri. (a) Nano h-B4C kaplı kumaş, (b) MWCNTs kaplı kumaş ve (c) GNPs kaplı kumaş.

3.2.1.4. Raman spektroskopisi (RAMAN) verileri

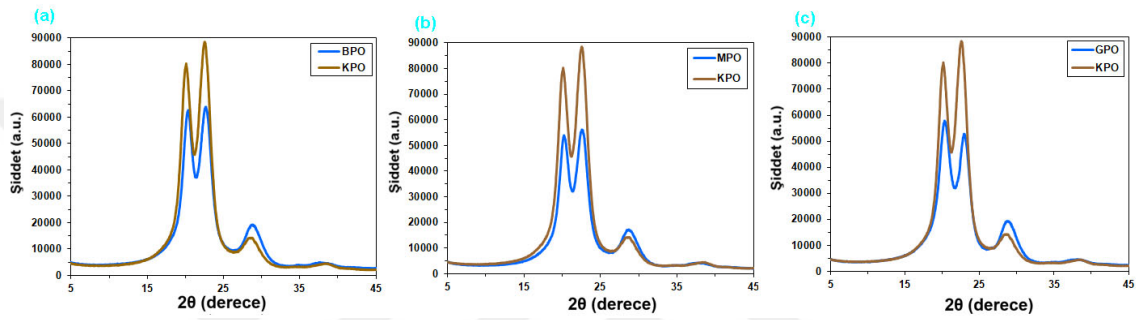
Nano h-B₄C, MWCNTs ve GNPs nano kaplamalı p-aramid kumaş yapıların Raman spektroskopisi (RAMAN) verileri Şekil 3.4(a-i)'de görülmektedir. Bu veriler nano malzemelerin filament yüzeyi yada kumaş yüzeyi ile olası yaptığı bağlar hakkında bilgi edinmek ve enerji sönmüleme prosesine katkısı ve kumaştan iplik çekme ile ilgili davranış mekanizmalarının anlaşılması amacı ile yapılmıştır.



Şekil 3.4. Nano kaplı p-aramid lif, nanoparçacıklar ve kontrol p-aramid lifine ait Raman spektrumları ve haritalamaları. (a-c) Nano B₄C kaplı p-aramid kumaş, (d-f) MWCNTs kaplı kumaş, (g-i) GNPs kaplı kumaş.

3.2.1.5. XRD verileri

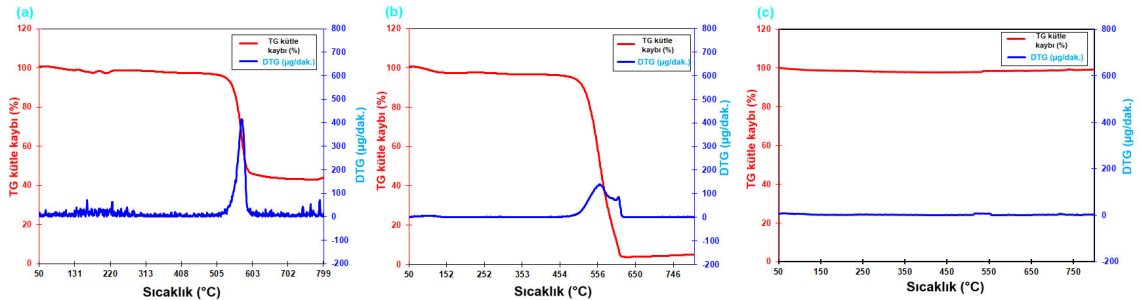
Nano h-B₄C, MWCNTs ve GNPs nano kaplamalı p-aramid kumaş yapıların X-ışını kırınım spektrum verileri Şekil 3.5(a-c)' de görülmektedir. Bu veriler nano malzemelerin filamentsi kumaşa kaplanması ile kristal yapıları hakkında gerekli bilgilerin elde edilmesi ve bunun olası kumaştan iplik çekme (pull-out) özelliklere etkileri ile enerji sönmleme prosesine katkısının anlaşılması amacı ile yapılmıştır. Ayrıca, “ardıl sıkıştırma yöntemi” (iterative compression method) nın nano kaplama yapıya etkileri de irdelenmiştir.



Şekil 3.5. Nano kaplı p-aramid kumaş yapılar, nanoparçacıklar ve kontrol p-aramid lifine ait X-ışını kırınım spektrumu sonuçları. (a) Nano h-B₄C kaplı p-aramid kumaş, (b) MWCNTs kaplı kumaş, (c) GNPs kaplı kumaş.

3.2.1.6. TGA/DTA verileri

Nano h-B₄C kaplamalı p-aramid kumaş yapıların TGA/DTA verileri Şekil 3.6(a-c)' de görülmektedir. Bu veriler nano malzemelerin filamentsi kumaşa kaplanması ile termal kararlılıkları ve termal bozunmaları hakkında gerekli bilgilerin elde edilmesi ve bunun enerji sönmleme prosesine katkısının anlaşılması amacı ile yapılmıştır. Ayrıca, “ardıl sıkıştırma yöntemi” (iterative compression method) nın nano kaplama yapıya etkileri de irdelenmiştir.



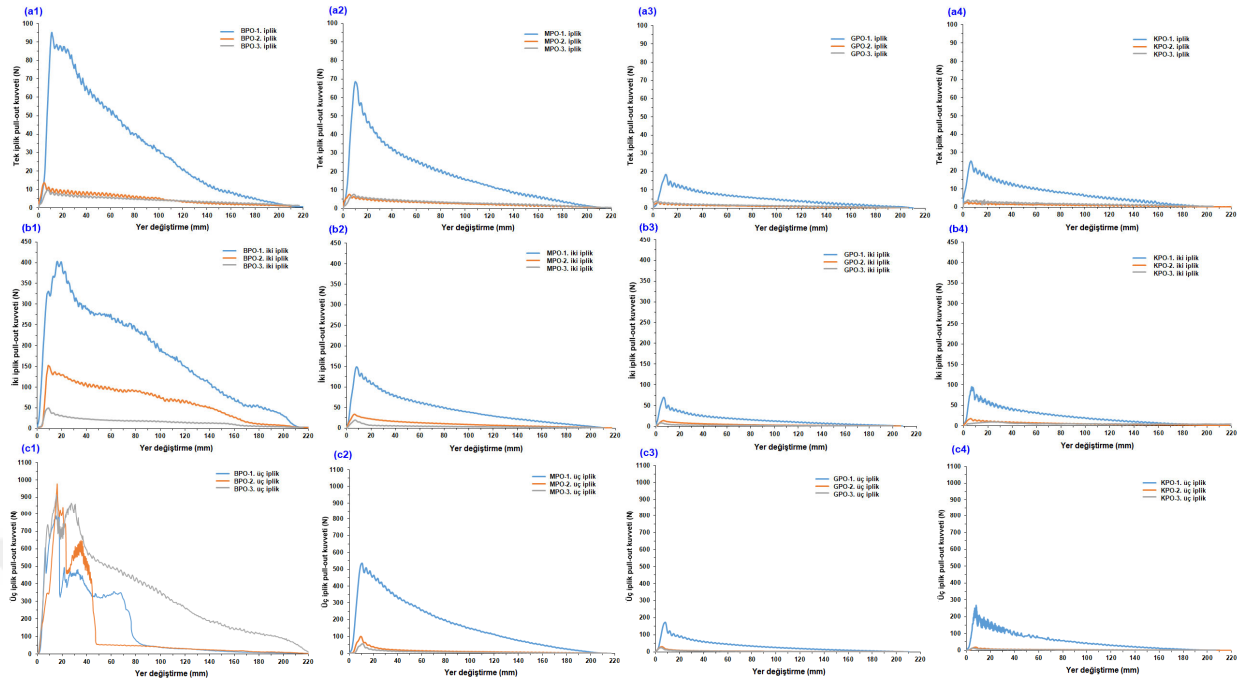
Şekil 3.6. Nano kaplı p-aramid kumaş, nanoparçacıklar ve kontrol p-aramid lifine ait termogravimetrik analiz (TGA) sonuçları. (a) Nano h-B₄C kaplı p-aramid kumaş, (b) Kontrol p-aramid kumaş ve (c) Nano B₄C.

3.2.1.7. Nano kaplı kumaşlarda tekli ve çoklu iplik çekimiyle kuvvet-yer değiştirme

Nano h-B₄C, MWCNTs ve GNPs nano kaplamalı p-aramid kumaş yapıların tekli ve çoklu iplik çekimiyle kuvvet(N)-yer değiştirme(mm) verileri Tablo 3.2. de verilmiştir. Ayrıca, Şekil 3.7(a1-c4)' de nano kaplı p-aramid kumaş yapıları için tek iplik ve çoklu iplik (2-uçlu ve 3-uçlu) ardışık pull-out kuvveti (N)-yer değiştirme (mm) grafikleri görülmektedir. Bu veriler nano malzemelerin filamentsi kumaşa kaplanması ile yapıda ortaya çıkan sürtünme esaslı tekli ve çoklu pull-out kuvvetlerindeki değişimler hakkında gerekli bilgilerin elde edilmesi ve bunun enerji sönmüleme sürecine katkısının anlaşılması amacı ile yapılmıştır.

Tablo 3.2. Nano kaplı p-aramid kumaş yapıları için tek ve çoklu maksimum çekme kuvveti-yer değiştirme, ilk iplik çıkma kuvveti ve intra-iplik kayma dayanımı.

Örnek kodu	Pull-out kuvvet (max, N)	Yer değiştirme (mm)	İlk iplik çıkma kuvveti (N)	İplik arası kayma dayanımı (MPa)	İplik çekme dayanımı (N)
Tek iplik					
KPO	25,24	6,49	19,20	0,03	493,10±19,78
BPO	94,52	11,26	86,47	0,10	460,18±31,09
MPO	68,07	10,58	55,59	0,08	456,63±32,24
GPO	18,26	10,47	12,61	0,02	461,99±13,36
Çoklu iplikler					
İki iplik					
KPO	94,79	7,11	63,37	0,05	-
BPO	402,42	19,53	377,05	0,22	-
MPO	147,43	8,77	125,82	0,08	-
GPO	68,61	6,28	43,37	0,04	-
Üç iplik					
KPO	267,88	8,14	180,19	0,10	-
BPO	802,43	17,56	329,24	0,29	-
MPO	528,24	10,88	479,09	0,19	-
GPO	172,40	8,22	108,76	0,06	-



Şekil 3.7. Nano kaplı p-aramid kumaş yapıları için tek iplik ve çoklu iplik (2-uçlu ve 3- uçlu) ardışık pull-out kuvveti (N)-yer değiştirme (mm) grafikleri. (a1, b1, c1) Nano B₄C kaplı p-aramid kumaş (BPO), (a2, b2, c2) MWCNT kaplı p-aramid kumaş (MPO), (a3, b3, c3) GNP kaplı p-aramid kumaş ve (a4, b4, c4) Kontrol kumaşı.

3.2.1.8. Nano kaplı kumaşlarda tekli ve çoklu pull-out enerjisi

Nano h-B₄C, MWCNTs ve GNPs nano kaplamalı p-aramid kumaş yapıların tekli ve çoklu pull-out enerji verileri Tablo 3.3. de verilmiştir. Bu veriler nano malzemelerin filamentsi kumaşa kaplanması ile yapıda ortaya çıkan sürtünme esaslı tekli ve çoklu pull-out enerjilerindeki değişimler hakkında gerekli bilgilerin elde edilmesi ve bunun enerji sönmüleme sürecine katkısının anlaşılması amacı ile yapılmıştır.

Tablo 3.3. Nano kaplı p-aramid kumaş yapıları için tek ve çoklu pull-out enerji sonuçları.

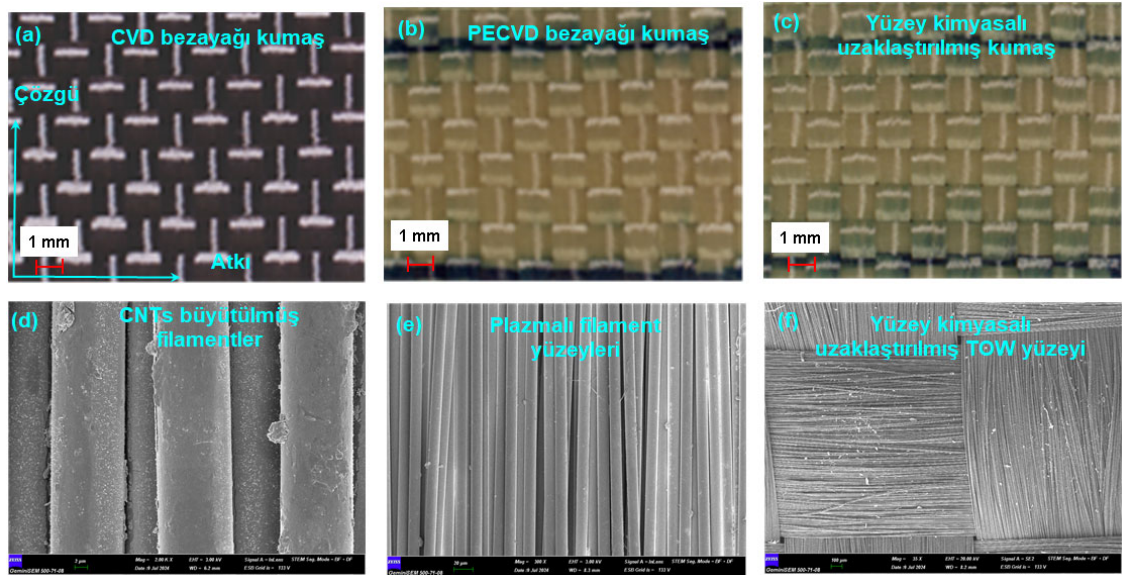
Örnek kodu	Krimp uzama enerjisi (J)	İlk iplik çıkma kuvveti enerjisi (J)	Tutunma-kayma enerjisi (J)	Toplam enerji (J)
Tek iplik				
KPO	0.10	0.06	1.34	1.50
BPO	0.42	0.21	6.14	6.77
MPO	0.33	0.21	3.30	3.84
GPO	0.09	0.04	0.95	1.07
Çoklu iplik				
İki iplik				
KPO	0.28	0.23	4.19	4.69
BPO	4.30	2.02	30.85	37.16
MPO	0.63	0.39	8.24	9.26
GPO	0.27	0.14	2.69	3.10
Üç iplik				
KPO	0.91	0.11	10.30	11.32
BPO	8.95	0.44	24.55	33.94
MPO	2.72	1.00	32.10	35.82
GPO	0.68	0.34	6.10	7.12

3.2.2 Kimyasal buharla biriktirme (CVD) ve plazma (PECVD) işlemleri p-aramid kumaş yapıları

Kumaştan iplik çekme verileri kimyasal buhar biriktirme(CVD) yöntemi üzerinden kumaş yüzeyinde nano malzeme büyüme (genellikle MWCNTs) ve plazma (PECVD) yöntemiyle kumaş yüzeyinde pürüzlülük oluşturarak ki bu filamentlerin yüzeyinde mikro çatlaklarla gerçekleşmektedir, sürtünme etkileri elde ederek olası enerji sönümlene kapasitesinin iyileşmesinin sağlanmasıdır. Elde edilen veriler malzemelerin yüzey morfolojileri, nano kaplı p-aramid kumaş yapısının kimyasal bileşimi ve konsantrasyonunu belirlemek amacıyla enerji dağılımlı X-ışını (EDX) analiz verileri, nano malzeme ve filamentsi yapı arasındaki bağ özelliklerini içeren veriler FTIR ve RAMAN üzerinden, nano kaplama p-aramid kumaş yapısının kristal yapıları ilgilendiren veriler XRD üzerinden, termal özellikler ve bunların bozulan ağırlıkları da TGA/DSC üzerinden belirlenmiştir. Ayrıca, tekli ve çoklu pull-out testleri ile CVD ve PECVD malzemelerin kuvvet-yer değiştirme ve enerji sönümlene verileri de bu kısımda verilmiştir.

3.2.2.1. Alan emisyonlu taramalı elektron mikroskop (FESEM) verileri

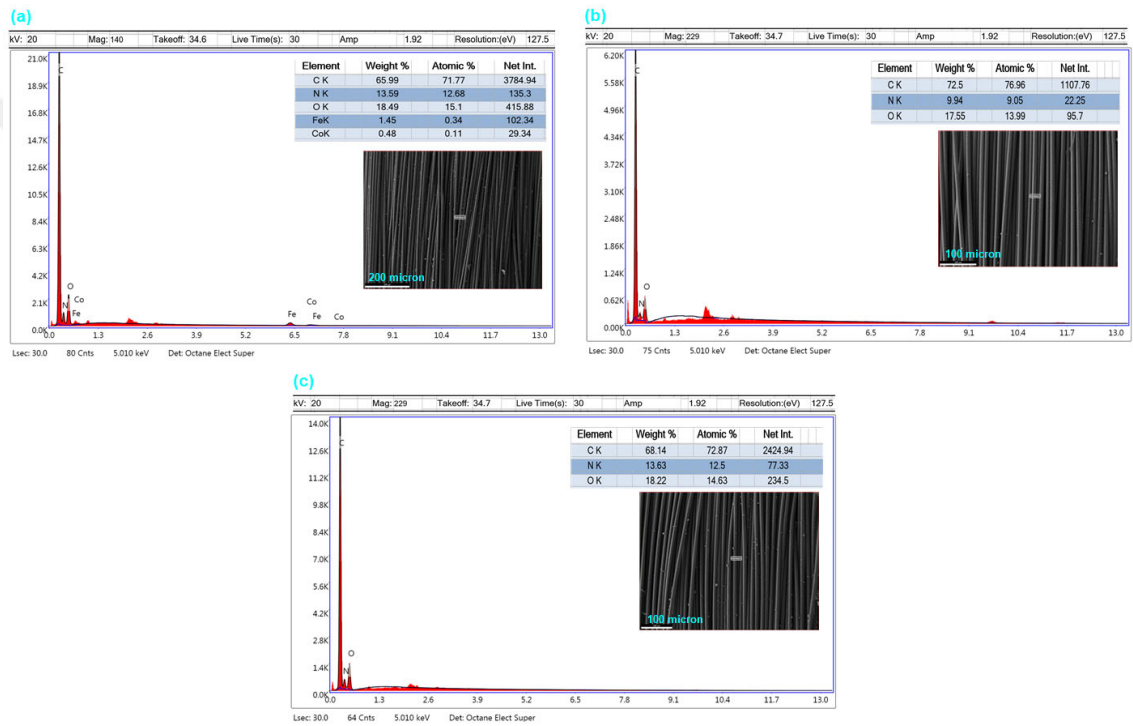
Karbon nanotüp büyütme, plazma uygulanmış ve kimyasal kaplaması uzaklaştırılmış ve kontrol p-aramid kumaş yapıları Şekil 3.8(a-f)' de görülmektedir. Para-aramid kumaşların yüzeyinde nano büyütme ve yüzeyi pürüzlenmiş formları özellikle soft balistik uygulamalar için filament-filament sürtünmeleri artırılmak amacı ile geliştirilmiş ve sürtünme esaslı enerji sönmeme özellikleri kazandırılmaya çalışılmıştır. Bu tez kapsamında geliştirilen p-aramid yapıların filament-filament yüzeyleri ve kumaş forumlamadan kaynaklanan arayüzey özellikleri ile birlikte incelenmesi sağlanmıştır.



Şekil 3.8. CVD ve PECVD işlemleri ile muamele edilmiş p-aramid kumaş yapılarına ait yüzey morfolojileri. (a) CVD ile karbon nanotüp büyütme (MWCNTs) p-aramid kumaş, (b) Plazma işlemi görmüş kumaş yüzeyi, (c) Yüzey kimyasal uzaklaştırılmış kumaş (Optik mikroskop), (d) Filament yüzeyinde büyütülmüş MWCNTs (FESEM, ölçek: 2 μ m, büyütme: 200x), (e) Plazma sonucu küçük çaplı filament bozunmaları (FESEM, ölçek: 20 μ m, büyütme: 200x) ve (f) Yüzey kimyasal uzaklaştırılmış kumaş yüzeyi (FESEM, ölçek: 100 μ m, büyütme: 33x).

3.2.2.2. EDX verileri

Karbon nanotüp büyütme, plazma uygulanmış ve kimyasal kaplaması uzaklaştırılmış p-aramid kumaş yapıların enerji dağılımlı X-ışını (EDX) analiz verileri Şekil 3.9(a-c)'de görülmektedir. Karbon nanotüp büyütme, plazma muamelesi ve yüzey kimyasal kaplamaları uzaklaştırılmış p-aramid kumaş yapıların kimyasal bileşimi ve konsantrasyonu belirlenerek pull-out yükü altında statik ve kinetik sürtünme olaylarının açıklanmasında yardımcı olacaktır.

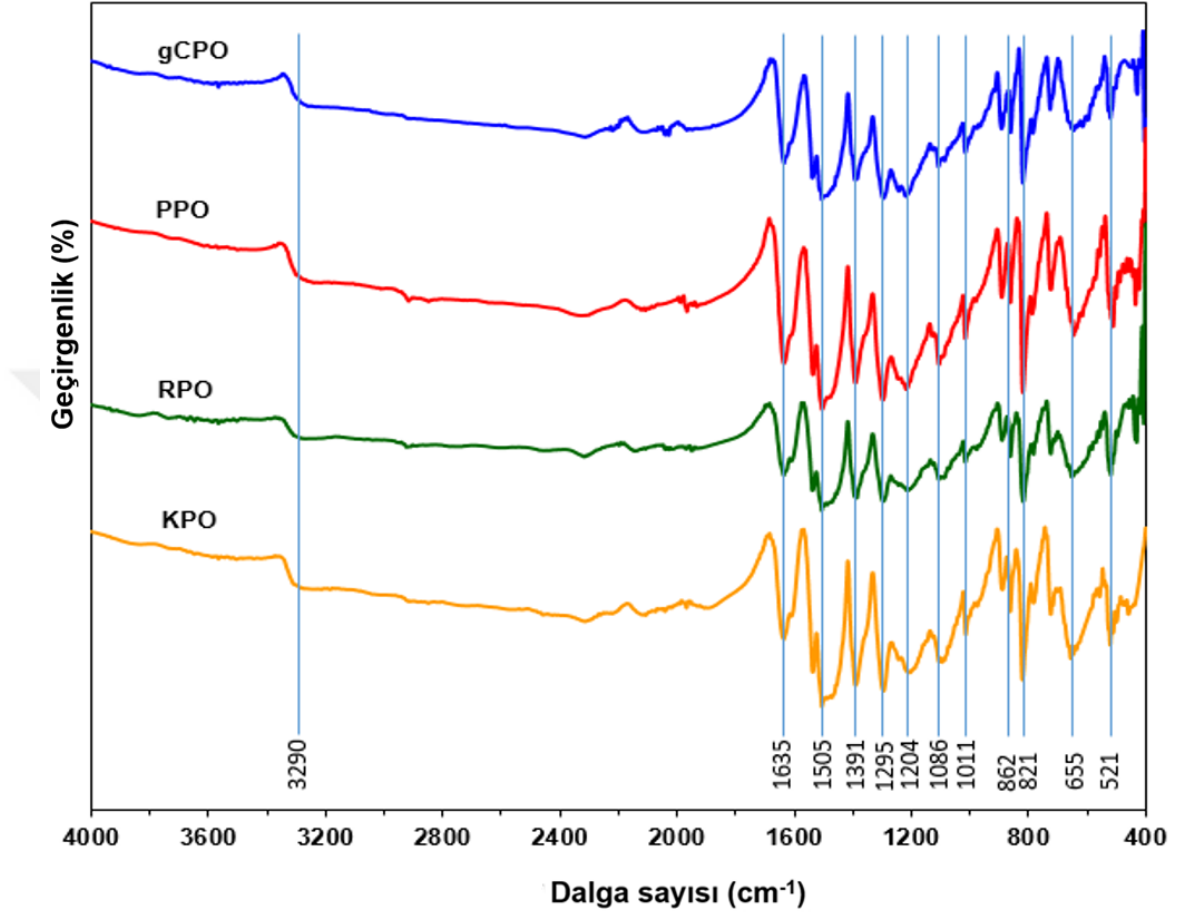


Şekil 3.9. Karbon nanotüp büyütme ve plazma muamelesi p-aramid kumaşların enerji dağılımlı X-ışını (EDX) analiz verileri. (a) MWCNTs büyütme kumaş, (b) Plazma muamelesi kumaş ve (c) Kimyasal kaplaması uzaklaştırılmış p-aramid kumaş.

3.2.2.3. Fourier dönüşüm kızılötesi spektroskopisi (FTIR) verileri

Karbon nanotüp büyütme, plazma uygulanmış ve kimyasal kaplaması uzaklaştırılmış p-aramid kumaş yapıların p-aramid kumaş yapıların fourier dönüşüm kızılötesi spektroskopisi (FTIR) verileri Şekil 3.10'de görülmektedir. Bu veriler nano büyütme ve yüzey pürüzlenme ile yapıdaki değişimler hakkında malzemelerin filament yüzeyi yada kumaş yüzeyi ile olası yaptığı kimyasal yada fiziksel etkileşimler hakkında bilgi edinmek

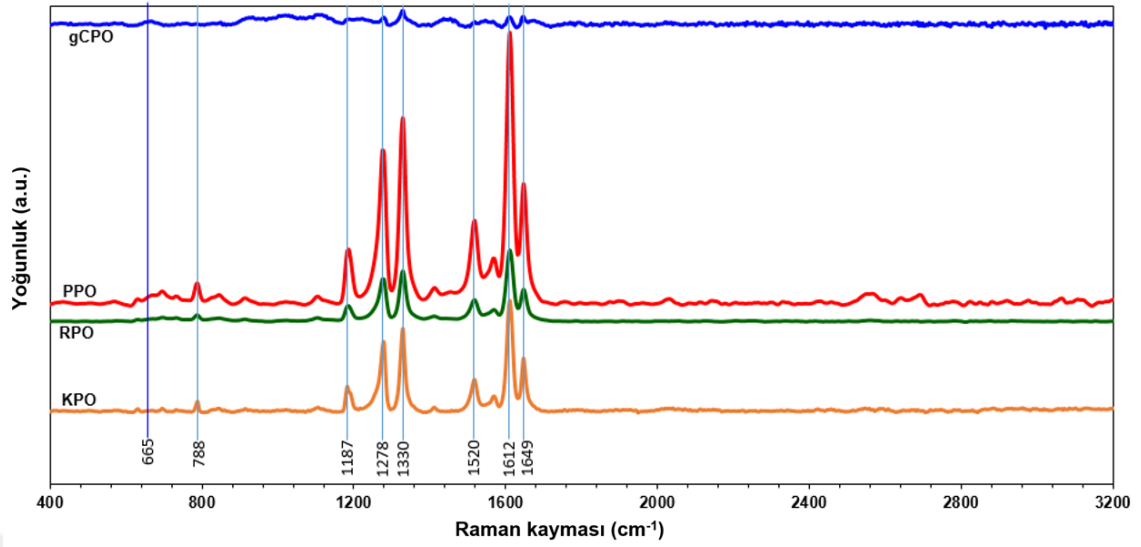
ve olası enerji sönümlleme prosesine katkısı ve davranış mekanizmalarının açığa çıkarılması amacı ile yapılmıştır.



Şekil 3.10. Karbon nanotüp büyütmeli, plazma muameleli, yüzey kaplaması uzaklaştırılmış ve kontrol kumaşın fourier dönüşüm kızılötesi spektroskopisi verileri.

3.2.2.4. Raman spektroskopisi (RAMAN) verileri

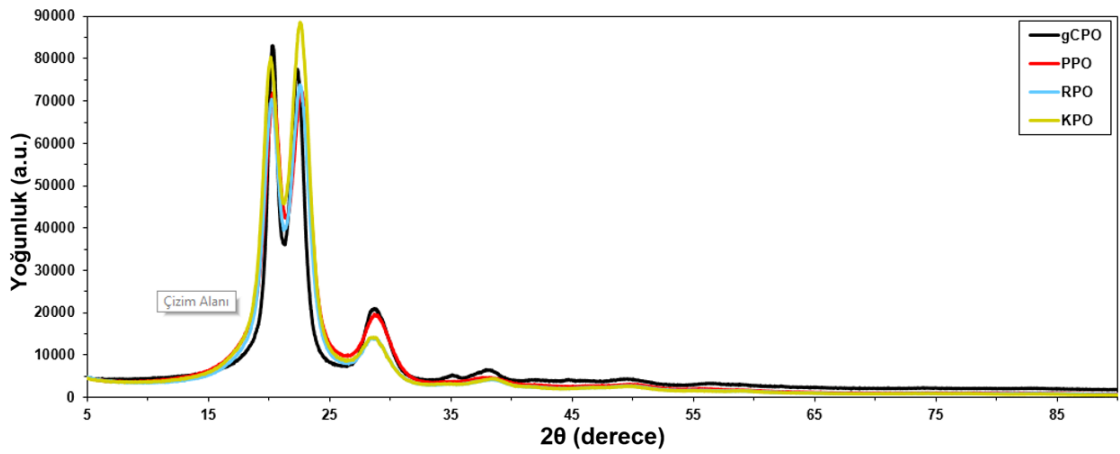
Karbon nanotüp büyütmeli, plazma uygulanmış ve kimyasal kaplaması uzaklaştırılmış p-aramid kumaş ve kontrol p-aramid kumaş yapıların raman spektroskopisi (RAMAN) verileri Şekil 3.11’ de görülmektedir. Bu veriler nano büyütmeye ve yüzey pürüzlenme ile yapıdaki değişimler hakkında malzemelerin filament yüzeyi yada kumaş yüzeyi ile olası yaptığı kimyasal yada fiziksel etkileşimler hakkında özellikle raman kaymaları konusunda bilgi edinmek ve olası enerji sönümlleme prosesine katkısı ve davranış mekanizmalarının açığa çıkarılması amacı ile yapılmıştır.



Şekil 3.11. Karbon nanotüp büyütme, plazma muameleli, yüzey kaplaması uzaklaştırılmış ve kontrol kumaşın raman spektroskopisi verileri.

3.2.2.5. XRD verileri

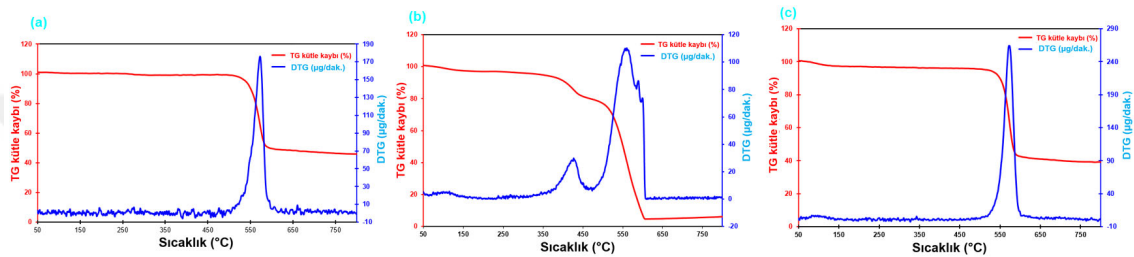
Karbon nanotüp büyütme, plazma uygulanmış ve kimyasal kaplaması uzaklaştırılmış p-aramid kumaş ve kontrol p-aramid kumaş yapıların X-ışını kırınım spektrumu sonuçları Şekil 3.12’ de görülmektedir. Bu veriler nano malzemelerin filamentsi kumaş yüzeylerin kristal yapıları hakkında gerekli bilgilerin elde edilmesi ve bunun olası pull-out özelliklere etkileri ile enerji sönmüleme sürecine katkısının anlaşılması amacı ile yapılmıştır.



Şekil 3.12. Karbon nanotüp büyütme, plazma muameleli, yüzey kaplaması uzaklaştırılmış ve kontrol p-aramid lifine ait X-ışını kırınım spektrumu sonuçları.

3.2.2.6. TGA/DTA verileri

Kimyasal buharlama ile p-aramid kumaş yüzeyinde karbon nanotüp büyütme, plazma ile kumaş yüzeyinde prüzlenme ve kimyasal kaplaması uzaklaştırılmış kumaşla kontrol kumaş yapıların TGA/DTA verileri Şekil 3.13(a-c)' de görülmektedir. Bu veriler elektriksel-kimyasal işlemlerin kumaşın termal kararlılıkları ve termal bozunmaları hakkında gerekli bilgilerin elde edilmesi ve bunun enerji sönümleme prosesine katkısının anlaşılması amacı ile yapılmıştır.



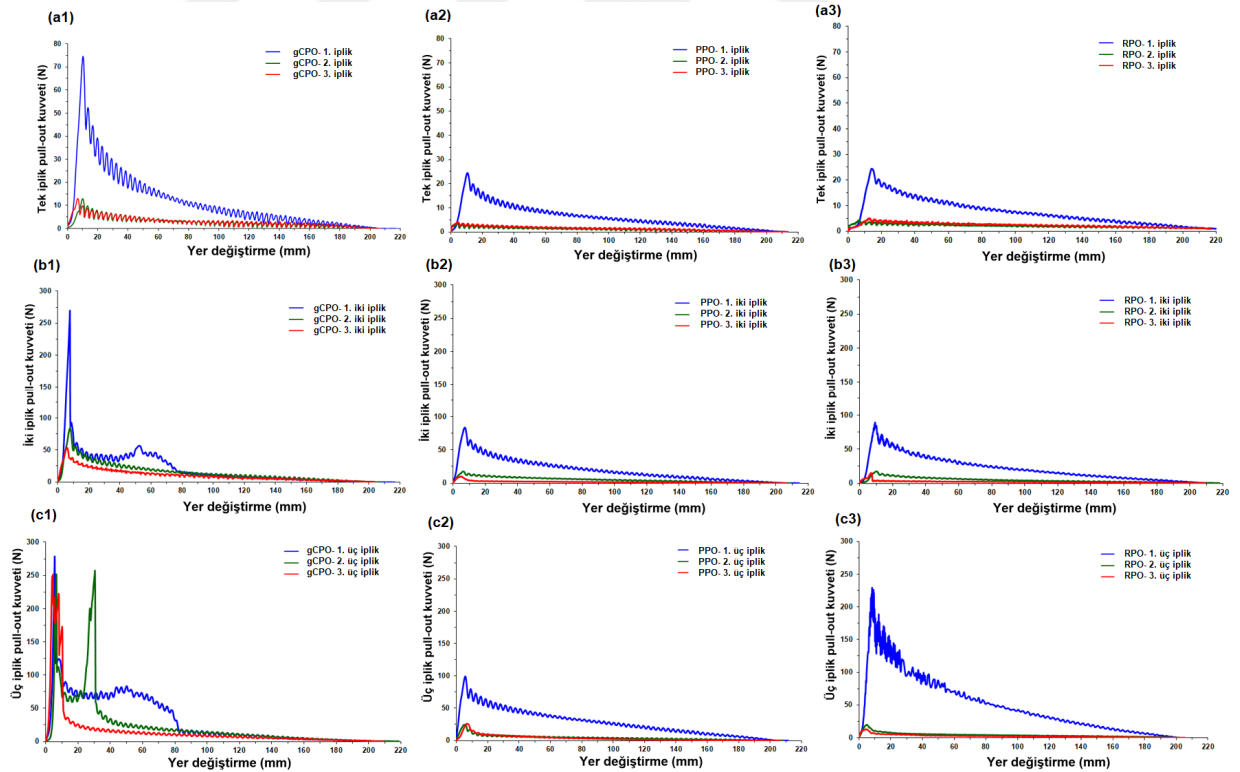
Şekil 3.13. CVD, PECVD ve kimyasal kaplama uzaklaştırılmış p-aramid lifine ait termogravimetrik analiz (TGA) sonuçları. (a) CVD p-aramid kumaş, b) PECVD p-aramid kumaş ve (c) Kimyasal kaplaması uzaklaştırılmış p-aramid kumaş.

3.2.2.7. CVD ve PECVD kumaşlarda tekli ve çoklu iplik çekimiyle kuvvet-yer değiştirme

Kimyasal buharlama ile p-aramid kumaş yüzeyinde karbon nanotüp büyütme, plazma ile kumaş yüzeyinde prüzlenme ve kimyasal kaplaması uzaklaştırılmış kumaşla kontrol kumaş yapıların tekli ve çoklu iplik çekimiyle kuvvet(N)-yer değiştirme(mm) verileri Tablo 3.4. de verilmiştir. Ayrıca, Şekil 3.14(a1-c3)' de elektriksel-kimyasal işlem görmüş p-aramid kumaş yapıları için tek iplik ve çoklu iplik (2-uçlu ve 3-uçlu) ardışık pull-out kuvveti (N)-yer değiştirme (mm) grafikleri görülmektedir. Bu veriler elektro-kimyasal işlemlerin filamentsi kumaşa etkileri ile yapıda ortaya çıkan sürtünme esaslı tekli ve çoklu pull-out kuvvetlerindeki değişimler hakkında gerekli bilgilerin elde edilmesi ve bunun enerji sönümleme sürecine katkısının anlaşılması amacı ile yapılmıştır.

Tablo 3.4. CVD ve PECVD p-aramid kumaş yapıları için tek ve çoklu maksimum çekme kuvveti-yer değiştirme, ilk iplik çıkma kuvveti ve intra-iplik kayma dayanımı.

Örnek kodu	Pull-out kuvvet (max, N)	Yer değiştirme (mm)	İlk iplik çıkma kuvveti (N)	İplik arası kayma dayanımı (MPa)	İplik çekme dayanımı (N)
Tek iplik					
gCPO	74,66	10,28	42,97	0,09	87,63±9,18
PPO	24,43	10,27	17,05	0,03	444,80±68,50
RPO	24,43	14,15	18,66	0,03	442,11±35,39
KPO	25,24	6,49	19,20	0,03	493,10±19,78
Çoklu iplik					
İki iplik					
gCPO	269,22	7,91	54,24	0,16	-
PPO	83,65	7,25	56,66	0,05	-
RPO	89,69	9,43	58,00	0,05	-
KPO	94,79	7,11	63,37	0,05	-
Üç iplik					
gCPO	278,48	5,59	117,25	0,11	-
PPO	98,83	5,76	65,38	0,04	-
RPO	229,07	8,16	176,43	0,08	-
KPO	267,88	8,14	180,19	0,01	-



Şekil 3.14. CVD ve PECVD p-aramid kumaş yapıları için tek iplik ve çoklu iplik (2 uçlu ve 3 uçlu) ardışık pull-out kuvveti (N)-yer değiştirme (mm) grafikleri. (a1,b1,c1) MWCNTs büyütülmüş p-aramid kumaş (gCPO), (a2,b2,c2) Plazma uygulanmış p-aramid kumaş (PPO), (a3,b3,c3) Kimyasal kaplaması uzaklaştırılmış p-aramid kumaş.

3.2.2.8. CVD ve PECVD kumaşlarda tekli ve çoklu pull-out enerjisi

Kimyasal buharlama ile p-aramid kumaş yüzeyinde karbon nanotüp büyütme, plazma ile kumaş yüzeyinde pürüzlenme ve kimyasal kaplaması uzaklaştırılmış kumaşla kontrol kumaş yapıların tekli ve çoklu pull-out enerji verileri Tablo 3.5 de verilmiştir.

Bu veriler elektro-kimyasal işlemlerin filamentsi kumaşa etkileri ile yapıda ortaya çıkan sürtünme esaslı tekli ve çoklu pull-out enerjilerindeki değişimler hakkında gerekli bilgilerin elde edilmesi ve bunun enerji sönmüleme sürecine katkısının anlaşılması amacı ile yapılmıştır.

Tablo 3.5. CVD ve PECVD p-aramid kumaş yapıları için tek ve çoklu pull-out enerji sonuçları.

Örnek kodu	Krimp uzama enerjisi (J)	İlk iplik çıkma kuvveti enerjisi (J)	Tutunma-kayma enerjisi (J)	Toplam enerji (J)
Tek iplik				
gCPO	0,30	0,12	2,03	2,44
PPO	0,10	0,06	1,12	1,28
RPO	0,12	0,07	1,46	1,65
KPO	0,10	0,06	1,34	1,50
Çoklu iplik				
İki iplik				
gCPO	0,74	0,05	3,70	4,48
PPO	0,33	0,15	3,60	4,09
RPO	0,33	0,17	4,16	4,66
KPO	0,28	0,23	4,19	4,69
Üç iplik				
gCPO	0,42	0,11	6,17	6,70
PPO	0,35	0,16	5,22	5,73
RPO	0,75	0,48	9,07	10,30
KPO	0,91	0,11	10,30	11,32

3.3. Sürtünme verileri

3.3.1. Nano kaplama kumaş yapılar

Statik sürtünme katsayısı kuru ve yaş formda nano h-B₄C, MWCNTs ve GNPs nano kaplamalı p-aramid yapılar üzerinden elde edilmiştir. Statik sürtünme katsayıları Erciyes Üniversitesi, Tekstil mühendisliği bölümünde geliştirilen kapstan prensibine göre tasarlanmış cihaz üzerinden ham veriler olarak elde edilmiştir. Sürtünme katsayısı hesaplamaları ise geleneksel Euler bağıntıları üzerinden belirlenmiştir. Öte yandan, kinetik sürtünme katsayıları kuru formda pull-out kuvvet(N)-yer değiştirme(mm) grafiklerinin tutunma-kayma fazından hesaplanarak belirlenmiştir. Nano kaplama

kumaşlardan elde edilen statik ve kinetik sürtünme katsayıların kuru ve yaş formundaki değerleri Tablo 3.6 de verilmiştir.

Tablo 3.6. Nano kaplamalı p-aramid kumaşların kuru ve ıslak formdaki tekli ve çoklu (2- ve 3-iplik ucu) statik ve kinetik sürtünme katsayıları.

Örnek kodu	Statik sürtünme katsayısı - kuru (μ_{sc})	Statik sürtünme katsayısı - yaş (μ_{sc})	Kinetik sürtünme katsayısı - kuru (μ_{kp})
Tek iplik			
KPO	0,22 ± 0,01	0,22 ± 0,01	0,11± 0,02
BPO	0,31 ± 0,02	0,31 ± 0,01	0,13±0,07
MPO	0,22 ± 0,01	0,21 ± 0,01	0,13±0,01
GPO	0,14 ± 0,01	0,16 ± 0,01	0,10±0,02
Çoklu iplik			
İki iplik			
KPO	0,23 ± 0,01	0,22 ± 0,01	0,13±0,03
BPO	0,32 ± 0,01	0,31 ± 0,01	0,10±0,05
MPO	0,23 ± 0,01	0,23 ± 0,01	0,11±0,03
GPO	0,15 ± 0,01	0,17 ± 0,01	0,12±0,03
Üç iplik			
KPO	0,25 ± 0,01	0,24 ± 0,01	0,15±0,05
BPO	0,33 ± 0,02	0,33 ± 0,01	0,10±0,00
MPO	0,25 ± 0,01	0,24 ± 0,01	0,13±0,03
GPO	0,15 ± 0,01	0,18 ± 0,01	0,14±0,04

3.3.2. Kimyasal buharla biriktirme (CVD) ve plazma (PECVD) işlemleri p-aramid kumaş yapılar

Statik sürtünme katsayısı kuru ve yaş formda kimyasal buhar biriktirme ile MWCNTs büyütülmüş, plazma uygulaması ile yüzeyi pürüzlenmiş ve kimyasal kaplaması uzaklaştırılmış p-aramid yapılar üzerinden elde edilmiştir. Statik sürtünme katsayıları kapstan prensibine göre tasarlanmış cihaz üzerinden ham veriler olarak elde edilmiştir. Sürtünme katsayı hesaplamaları ise geleneksel Euler bağıntıları üzerinden belirlenmiştir. Öte yandan, kinetik sürtünme katsayıları kuru formda pull-out kuvvet(N)-yer değiştirme(mm) grafiklerinin tutunma-kayma fazından hesaplanarak belirlenmiştir. Nano MWCNTs büyütme, plazma muamelesi ve kimyasal kaplaması uzaklaştırılmış kumaşlardan elde edilen statik ve kinetik sürtünme katsayıların kuru ve yaş formundaki değerleri Tablo 3.7 de verilmiştir.

Tablo 3.7. CVD, PECVD ve kimyasal kaplaması uzaklaştırılmış p-aramid kumaşların kuru ve ıslak formdaki tekli ve çoklu (2- ve 3-iplik ucu) statik ve kinetik sürtünme katsayıları.

Örnek kodu	Statik sürtünme katsayısı - kuru (μ_{sc})	Statik sürtünme katsayısı - yaş (μ_{sc})	Kinetik sürtünme katsayısı - kuru (μ_{kp})
Tek iplik			
gCPO	$0,30 \pm 0,01$	$0,30 \pm 0,01$	$0,18 \pm 0,12$
PPO	$0,21 \pm 0,01$	$0,21 \pm 0,01$	$0,12 \pm 0,08$
RPO	$0,22 \pm 0,01$	$0,22 \pm 0,01$	$0,08 \pm 0,02$
KPO	$0,22 \pm 0,01$	$0,22 \pm 0,01$	$0,15 \pm 0,07$
Çoklu iplikler			
İki iplik			
gCPO	$0,32 \pm 0,01$	$0,305 \pm 0,01$	$0,15 \pm 0,11$
PPO	$0,22 \pm 0,01$	$0,209 \pm 0,01$	$0,13 \pm 0,06$
RPO	$0,23 \pm 0,01$	$0,218 \pm 0,01$	$0,12 \pm 0,06$
KPO	$0,23 \pm 0,01$	$0,223 \pm 0,01$	$0,13 \pm 0,04$
Üç iplik			
gCPO	$0,32 \pm 0,01$	$0,31 \pm 0,01$	$0,16 \pm 0,12$
PPO	$0,21 \pm 0,01$	$0,21 \pm 0,01$	$0,10 \pm 0,05$
RPO	$0,24 \pm 0,01$	$0,24 \pm 0,01$	$0,13 \pm 0,03$
KPO	$0,25 \pm 0,01$	$0,24 \pm 0,01$	$0,13 \pm 0,03$

3.4. Balistik veriler (Yüksek hız)

Nano hegzogonal bor karbür katkılı (nh-B₄C) ve kontrol para-aramid/epoksi balistik plakalar üzerinde çoklu parçacık esaslı mermilerin (FSP) kullanımı ile atışlar, balistik plaka yapılar özellikle nano katkının etkileri balistik koruma üzerinden değerlendirmek amacı ile yapılarak kontrol balistik plakalar ile kıyaslamalı olarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler nano bor karbür katkılı ve kontrol balistik plakalar için tablo formunda verilmiştir.

Tablo 3.8 de para-aramid/epoksi balistik plaka için çoklu atış sonuçları ve sönümlenen enerji değerleri, Tablo 3.9 de para-aramid/epoksi balistik plaka için çoklu atış sonrası bozunma boyutları ve bozunma boyutları üzerinden sönümlenen enerji değerleri, Tablo 3.10' de para-aramid/epoksi balistik plaka için çoklu atış sonrası çözgü, atkı ve kalınlık boyunca lokal artık şekil değişimi ve bozunan katman sayısı ve Tablo 3.11' de para-aramid/epoksi balistik plaka için çoklu atış sonrası çıkış FSP üzerinden lokal dinamik bozunma boyutlarını göstermektedir. Öte yandan, Tablo 3.12 ise nano h-B₄C katkılı para-aramid/epoksi balistik plaka için çoklu atış sonuçları ve sönümlenen enerji değerleri, Tablo 3.13 de nano B₄C katkılı para-aramid/epoksi balistik plaka için çoklu atış sonrası bozunma boyutları ve bozunma boyutları üzerinden sönümlenen enerji değerleri, Tablo 3.14 de ise nano h-B₄C katkılı para-aramid/epoksi balistik plaka için çoklu atış sonrası çözgü, atkı ve kalınlık boyunca lokal artık şekil değişimi ve bozunan katman sayısı ve

Tablo 3.15 de Nano h-B₄C katkılı para-aramid/epoksi balistik plaka için çoklu atış sonrası çıkış FSP üzerinden lokal dinamik bozunma boyutlarını göstermektedir.

Tablo 3.8. Para-aramid/epoksi balistik plaka için çoklu atış sonuçları ve sönümlenen enerji değerleri.

Nanobalistik kod	En x Boy x Kalınlık (mm x mm x mm)	Plaka ağırlık (gram)	Parçacık mermi ağırlığı (gram)	Mermi giriş hızı (m/s)	Mermi çıkış hızı (m/s)	Sönümlenen enerji (J)	Spesifik enerji-ölçülen yoğunluk (J/g.cm ⁻³)	Sönümlenen enerji-bozunma katman-ağırlık (J/Kg)
Kontrol								
NBK8	273,5x 272,5 x 27,59	2451,10	2,866	-	-	-	-	-
NBK8-1	273,5x 272,5 x 27,59	2451,10	2,866	475,00	-	323,32	268,54	351,76
NBK8-2	273,5x 272,5 x 27,59	2451,10	2,866	624,00	-	557,98	463,44	455,29
NBK8-3	273,5x 272,5 x 27,59	2451,10	2,866	685,00	-	672,40	558,47	438,92
NBK8-4	273,5x 272,5 x 27,59	2451,10	2,866	722,70	-	748,45	621,64	407,14
NBK8-6	273,5x 272,5 x 27,59	2451,10	2,866	752,00	-	810,37	673,06	440,82
NBK8-5	273,5x 272,5 x 27,59	2451,10	2,866	801,70	-	921,02	764,97	429,44
NBK8-7	273,5x 272,5 x 27,59	2451,10	2,866	811,00	-	942,51	782,82	439,46
NBK8-11	273,5x 272,5 x 27,59	2451,10	2,866	849,30	146,38	1002,93	833,00	409,18
NBK8-10	273,5x 272,5 x 27,59	2451,10	2,866	892,90	275,50	1033,72	858,57	421,74
NBK8-9	273,5x 272,5 x 27,59	2451,10	2,866	905,00	305,08	1040,29	864,03	424,42
NBK8-8	273,5x 272,5 x 27,59	2451,10	2,866	928,00	333,87	1074,34	892,31	438,31
NBK8-12	273,5x 272,5 x 27,59	2451,10	2,866	958,70	401,15	1086,48	902,39	443,26
NBK8-13	273,5x 272,5 x 27,59	2451,10	2,866	978,00	443,37	1088,95	904,44	444,27
Ortalama	273,5x 272,5 x 27,59	2451,10	2,866	769,75	317,56	869,44	722,13	426,46
S. sapma	0,00	0,00	0,00	170,72	104,22	236,55	196,47	26,44
Cv (%)	0,00	0,00	0,00	22,18	32,82	27,207	27,207	6,20

Tablo 3.9. Para-aramid/epoksi balistik plaka için çoklu atış sonrası bozunma boyutları ve bozunma boyutları üzerinden sönümlenen enerji değerleri.

Nanobalistik kod	En x Boy x Kalınlık (mm x mm x mm)	Plaka ağırlık (gram)	Üst koni boyut çap x alt koni boyut çapı x derinlik (mm x mm x mm)	Çıkan lif yüksekliği (mm)	Bozulan üst alan x alt alan (mm ² x mm ²)	Sönümlenen enerji-bozunma hacim (J/cm ³)	Bozunma katman sayısı
Kontrol							
NBK8	273,5 x 272,5 x 27,59	2451,10	-	-	-	-	-
NBK8-1	273,5 x 272,5 x 27,59	2451,10	9,91 x 12,87 x 10,41	-	77,09 x 130,02	303,27	3
NBK8-2	273,5 x 272,5 x 27,59	2451,10	10,82 x 13,21 x 13,90	-	91,90 x 136,99	353,07	4
NBK8-3	273,5 x 272,5 x 27,59	2451,10	11,16 x 14,70 x 17,31	-	97,76 x 169,63	294,14	5
NBK8-4	273,5 x 272,5 x 27,59	2451,10	11,35 x 14,85 x 20,79	-	101,12 x 173,11	265,66	6
NBK8-6	273,5 x 272,5 x 27,59	2451,10	11,62 x 15,36 x 20,79	-	105,99 x 185,20	271,12	6
NBK8-5	273,5 x 272,5 x 27,59	2451,10	12,26 x 16,60 x 24,30	-	117,99 x 216,31	230,14	7
NBK8-7	273,5 x 272,5 x 27,59	2451,10	12,39 x 16,86 x 24,30	2,90	120,51 x 223,14	229,22	7
NBK8-11	273,5 x 272,5 x 27,59	2451,10	12,51 x 15,64 x 27,59	6,85	122,85 x 192,02	232,79	8
NBK8-10	273,5 x 272,5 x 27,59	2451,10	12,82 x 16,90 x 27,59	7,39	129,02 x 224,20	214,80	8
NBK8-9	273,5 x 272,5 x 27,59	2451,10	12,97 x 17,16 x 27,59	7,13	132,05 x 231,16	210,28	8
NBK8-8	273,5 x 272,5 x 27,59	2451,10	13,23 x 17,43 x 27,59	7,08	137,40 x 238,49	209,76	8
NBK8-12	273,5 x 272,5 x 27,59	2451,10	13,45 x 17,88 x 27,59	8,02	142,01 x 250,96	203,07	8
NBK8-13	273,5 x 272,5 x 27,59	2451,10	13,48 x 19,56 x 27,59	8,67	142,64 x 300,34	182,18	8
Ortalama	273,5 x 272,5 x 27,59	2451,10	12,15 x 16,07 x 22,87	6,86	116,79 x 205,50	246,12	6,61
S. sapma	0,00	0,00	1,10 x 1,88 x 5,86	1,86	20,58 x 47,35	48,53	1,70
Cv (%)	0,00	0,00	9,08 x 11,71 x 25,65	27,07	17,62 x 23,04	19,72	25,84

Tablo 3.10. Para-aramid/epoksi balistik plaka için çoklu atış sonrası çözgü, atkı ve kalınlık boyunca lokal artık şekil değişimi ve bozunan katman sayısı.

Nanobalistik kod	Lokal artık şekil değişimi-derinlik (mm)	Lokal artık şekil değişimi-çözgü x atkı yönü (mm x mm)	Parçacık çıkış açısı (°)	Parçacık kalış süresi (μs)	Artık şekil değişim katman sayısı-çözgü x atkı yönü	Artık şekil değişim katman sayısı-derinlik
Kontrol						
NBK8	27,59					
NBK8-1	6,25 + 24,14 = 30,39	16 x 15	-	-	4	8
NBK8-2	7,37 + 24,14 = 31,51	23 x 21	-	-	5	8
NBK8-3	7,87 + 24,14 = 32,01	24 x 23	-	-	6	8
NBK8-4	8,32 + 24,14 = 32,46	25 x 24	-	-	7	8
NBK8-6	9,28 + 24,14 = 33,42	32 x 26	-	-	7	8
NBK8-5	9,98 + 24,14 = 34,12	34 x 28	-	-	8	8
NBK8-7	13,20 + 24,14 = 37,34	36 x 36	-	-	8	8
NBK8-11	16,43 + 24,14 = 40,57	38 x 38	3,81	55,42	8>	8
NBK8-10	15,75 + 24,14 = 39,89	38 x 38	13,13	47,23	8>	8
NBK8-9	14,50 + 24,14 = 38,64	48 x 40	9,78	45,57	8>	8
NBK8-8	16,14 + 24,14 = 40,28	54 x 50	3,37	43,72	8>	8
NBK8-12	16,97 + 24,14 = 41,11	63 x 53	2,42	40,58	8>	8
NBK8-13	17,09 + 24,14 = 41,23	70 x 62	0,61	38,82	8>	8
Ortalama	12,24 + 24,14 = 36,38	38,54 x 34,92	5,52	55,42	-	8
S. sapma	4,13	16,15 x 13,88	4,84	47,23	-	0
Cv (%)	11,36	41,92 x 39,75	87,72	45,57	-	0

Tablo 3.11. Para-aramid/epoksi balistik plaka için çoklu atış sonrası çıkış FSP üzerinden lokal dinamik bozunma boyutları.

Nanobalistik Kod	Lokal dinamik şekil değişimi-çıkış öncesi derinlik (mm)	Lokal dinamik şekil değişimi-çıkış öncesi çözgü x atkı yönü (mm)	Lokal dinamik şekil değişimi-çıkış derinlik (mm)	Lokal dinamik şekil değişimi-çıkış çözgü x atkı yönü (mm)	Ölçülen katman
Kontrol					
NBK8	27,59	-	-	-	-
NBK8-1	-	-	-	-	8
NBK8-2	-	-	-	-	8
NBK8-3	15,93	50,88 x 50,88	-	-	8
NBK8-4	20,92	53,00 x 53,00	-	-	8
NBK8-6	22,54	57,43 x 57,43	-	-	8
NBK8-5	29,79	75,53 x 75,53	-	-	8
NBK8-7	31,52	75,57 x 75,57	-	-	8
NBK8-11	-	-	-	-	8
NBK8-10	-	-	-	-	8
NBK8-9	36,55	86,76 x 86,76	36,89	111,58 x 61,92	8
NBK8-8	38,04	90,61 x 90,61	42,27	114,37 x 69,05	8
NBK8-12	-	-	-	-	8
NBK8-13	-	-	-	-	8
Ortalama	27,89	69,96 x 69,96	39,58	112,98 x 65,49	8
S. sapma	8,31	16,22 x 16,22	3,80	1,97 x 5,04	0
Cv (%)	29,81	23,19 x 23,19	9,61	1,75 x 7,70	0

Tablo 3.12. Nano B₄C katkılı para-aramid/epoksi balistik plaka için çoklu atış sonuçları ve sönümlenen enerji değerleri.

Nanobalistik kod	En x Boy x Kalınlık (mm x mm x mm)	Plaka ağırlık (gram)	Parçacık mermi ağırlığı (gram)	Mermi giriş hızı (m/s)	Mermi çıkış hızı (m/s)	Sönümlenen enerji (J)	Spesifik enerji-ölçülen yoğunluk (J/g.cm ³)	Sönümlenen enerji-bozunan katman-ağırlık (J/Kg)
B4C(%0,3)								
NBB8	271,7 x 268 x 28,02	2430,70	2,866	-	-	-	-	-
NBB8-1	271,7 x 268 x 28,02	2430,70	2,866	518,60	-	385,40	321,65	422,81
NBB8-2	271,7 x 268 x 28,02	2430,70	2,866	633,20	-	574,55	479,51	378,20
NBB8-3	271,7 x 268 x 28,02	2430,70	2,866	694,10	-	690,38	576,18	454,44
NBB8-4	271,7 x 268 x 28,02	2430,70	2,866	732,70	-	769,31	642,06	422,00
NBB8-5	271,7 x 268 x 28,02	2430,70	2,866	743,20	-	791,51	660,58	434,17
NBB8-6	271,7 x 268 x 28,02	2430,70	2,866	814,60	-	950,90	793,60	447,09
NBB8-7	271,7 x 268 x 28,02	2430,70	2,866	859,00	155,70	1022,64	853,48	420,72
NBB8-8	271,7 x 268 x 28,02	2430,70	2,866	913,40	165,56	1156,27	965,01	475,70
NBB8-9	271,7 x 268 x 28,02	2430,70	2,866	953,80	331,00	1146,65	956,98	471,74
NBB8-10	271,7 x 268 x 28,02	2430,70	2,866	1015,20	452,10	1184,00	988,15	487,10
Ortalama	271,7 x 268 x 28,02	2430,70	2,866	787,78	276,09	867,16	723,72	441,40
S. sapma	0,00	0,00	0,00	153,1174	142,25	270,30	225,58	32,63
Cv (%)	0,00	0,00	0,00	19,4366	51,52	31,17	31,17	7,39

Tablo 3.13. Nano B₄C katkılı para-aramid/epoksi balistik plaka için çoklu atış sonrası bozunma boyutları ve bozunma boyutları üzerinden sönümlenen enerji değerleri.

Nanobalistik kod	En x Boy x Kalınlık (mm x mm x mm)	Plaka ağırlık (gram)	Üst koni boyut çap x alt koni boyut çapı x derinlik (mm x mm x mm)	Çıkan lif yükseklik (mm)	Bozulan üst alan x alt alan (mm ² x mm ²)	Sönümlenen enerji-bozunan hacim (J/cm ³)	Bozunan katman sayısı
B4C(%0,3)							
NBB8	271,7 x 268 x 28,02	2430,70	-	-	-	-	-
NBB8-1	271,7 x 268 x 28,02	2430,70	11,04 x 14,11 x 10,40	-	95,68 x 156,29	297,06	3
NBB8-2	271,7 x 268 x 28,02	2430,70	13,01 x 17,22 x 17,31	-	132,87 x 232,77	183,89	5
NBB8-3	271,7 x 268 x 28,02	2430,70	13,31 x 17,71 x 17,31	-	139,07 x 246,21	209,80	5
NBB8-4	271,7 x 268 x 28,02	2430,70	14,41 x 17,95 x 20,79	-	163,00 x 252,93	179,35	6
NBB8-5	271,7 x 268 x 28,02	2430,70	14,69 x 18,14 x 20,79	-	169,40 x 258,31	179,33	6
NBB8-6	271,7 x 268 x 28,02	2430,70	15,05 x 18,84 x 24,30	-	177,80 x 278,63	172,89	7
NBB8-7	271,7 x 268 x 28,02	2430,70	15,37 x 19,04 x 28,02	5,01	185,45 x 284,58	156,47	8
NBB8-8	271,7 x 268 x 28,02	2430,70	15,48 x 20,02 x 28,02	5,09	188,11 x 314,63	165,95	8
NBB8-9	271,7 x 268 x 28,02	2430,70	15,62 x 22,49 x 28,02	5,98	191,53 x 397,05	142,04	8
NBB8-10	271,7 x 268 x 28,02	2430,70	17,70 x 23,91 x 28,02	8,61	245,93 x 448,78	123,44	8
Ortalama	271,7 x 268 x 28,02	2430,70	14,56 x 18,94 x 22,29	6,17	168,88 x 287,01	181,10	6,40
S. sapma	0,00	0,00	1,79 x 2,74 x 6,06	1,68	40,48 x 83,53	47,19	1,71
Cv (%)	0,00	0,00	12,34 x 14,50 x 27,19	27,27	23,97 x 29,10	26,07	26,70

Tablo 3.14. Nano B4C katkılı para-aramid/epoksi balistik plaka için çoklu atış sonrası çözgü, atkı ve kalınlık boyunca lokal artık şekil değişimi ve bozunan katman sayısı.

Nanobalistik kod	Lokal artık şekil değişimi-derinlik (mm)	Lokal artık şekil değişimi-çözgü x atkı yönü (mm x mm)	Parçacık çıkış açısı (°)	Parçacık kalış süresi (μs)	Artık şekil değişim katman sayısı-çözgü x atkı yönü	Artık şekil değişim katman sayısı-derinlik
B4C(%0,3)						
NBB8	28,02	-	-	-	-	-
NBB8-1	5,48 + 24,51 = 29,99	20 x 17	-	-	4	8
NBB8-2	6,56 + 24,51 = 31,07	25 x 22	-	-	6	8
NBB8-3	6,81 + 24,51 = 31,31	28 x 23	-	-	6	8
NBB8-4	6,82 + 24,51 = 31,32	30 x 25	-	-	7	8
NBB8-5	6,61 + 24,51 = 31,12	31 x 30	-	-	7	8
NBB8-6	8,05 + 24,51 = 32,56	32 x 31	-	-	8	8
NBB8-7	12,02 + 24,51 = 36,52	42 x 41	13,32	55,22	8>	8
NBB8-8	11,11 + 24,51 = 35,61	46 x 41	15,83	51,93	8>	8
NBB8-9	12,91 + 24,51 = 37,42	59 x 52	1,28	43,62	8>	8
NBB8-10	13,83 + 24,51 = 38,34	75 x 64	3,53	38,19	8>	8
Ortalama	9,02 + 24,51 = 33,53	38,80 x 34,60	8,49	47,24	-	8
S. sapma	3,10	17,08 x 14,82	7,16	7,76	-	0
Cv (%)	9,26	44,02 x 42,85	84,35	16,43	-	0

Tablo 3.15. Nano B4C katkılı para-aramid/epoksi balistik plaka için çoklu atış sonrası çıkış FSP üzerinden lokal dinamik bozunma boyutları.

Nanobalistik kod	Lokal dinamik şekil değişimi-çıkış öncesi derinlik (mm)	Lokal dinamik şekil değişimi-çıkış öncesi çözgü x atkı yönü (mm)	Lokal dinamik şekil değişimi-çıkış derinlik (mm)	Lokal dinamik şekil değişimi-çıkış çözgü x atkı yönü (mm)	Ölçülen katman
B4C(%0,3)					
NBB8	28,02	-	-	-	-
NBB8-1	10,90	37,66 x 37,66	-	-	8
NBB8-2	12,20	41,37 x 41,37	-	-	8
NBB8-3	-	-	-	-	8
NBB8-4	-	-	-	-	8
NBB8-5	20,52	52,35 x 52,35	-	-	8
NBB8-6	24,13	72,67 x 72,67	-	-	8
NBB8-7	25,11	81,37 x 81,37	26,62	99,32 x 58,49	8
NBB8-8	27,51	89,65 x 89,65	29,55	105,79 x 66,06	8
NBB8-9	29,18	105,16 x 105,16	43,72	109,66 x 70,88	8
NBB8-10	39,84	107,72 x 107,72	48,92	111,87 x 72,74	8
Ortalama	24,12	73,49 x 73,49	37,20	106,66 x 67,04	8
S. sapma	10,02	27,41 x 27,41	10,81	5,50 x 6,36	0
Cv (%)	41,52	37,30 x 37,30	29,05	5,16 x 9,48	0

3.5. Katarası basma verileri (aksiyal)

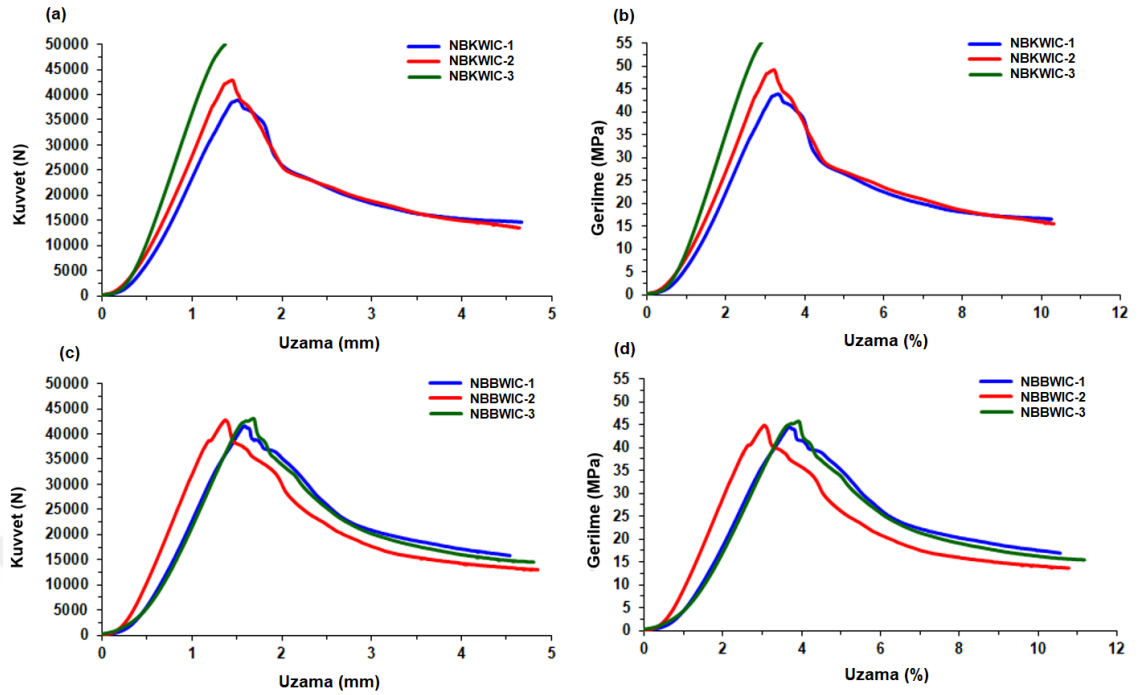
Nano hegzogonal bor karbür katkılı nh-B4C ve kontrol para-aramid/epoksi balistik plakalar üzerinde katarası basma testi(aksiyal) hem çözgü ve hem de atkı yönünde yapılmıştır. Böylelikle ana katmanların ki her biri, altı kumaş katmanından ve her plaka da sekiz adet katmandan oluşmuştur. Burada, sekiz katmanın birbirleri ile yapışma direnci katarası aksiyal basma testi ile belirlenmiş olacaktır. Özellikle nano katkının etkileri

balistik koruma üzerinden değerlendirilerek ve kontrol balistik plakalar ile kıyaslanmıştır. Elde edilen veriler nano bor karbür katkılı ve kontrol balistik plakaların çözgü ve atkı yönleri için tablo formunda hazırlanmıştır.

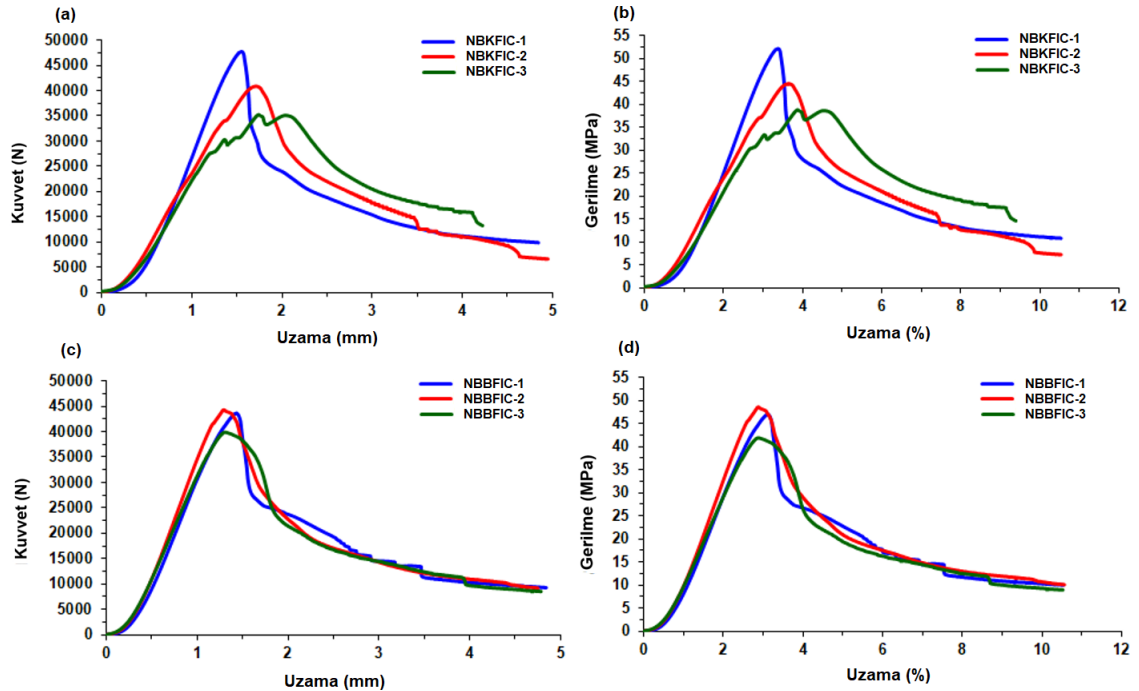
Tablo 3.16 de nano h-B4C katkılı para-aramid/epoksi balistik plaka için statik katarası aksiyal basma verileri hem çözgü ve hem de atkı yönü için verilmiştir. Ayrıca, Şekil 3.15(a-d)' de çözgü yönü nano h-B4C katkılı para-aramid/epoksi ve kontrol balistik plaka için statik katarası aksiyal basma grafikleri ve Şekil 3.16(a-d)' de ise atkı yönü nano h-B4C katkılı para-aramid/epoksi balistik plaka için statik katarası basma (aksiyal) grafikleri görülmektedir.

Tablo 3.16. Çözgü ve atkı yönü nano B4C katkılı para-aramid/epoksi balistik plaka için statik katarası aksiyal basma verileri.

Katarası basma (aksiyal)-çözgü kod	Kuvvet (N)	Uzama (mm)	Gerilme (MPa)	Uzama (%)	Katarası basma modülü (GPa)
Kontrol					
NBKWIC-1	38903,47	1,51	43,89	3,32	1,16
NBKWIC-2	42897,39	1,45	49,19	3,22	1,32
NBKWIC-3	49996,00	1,37	56,67	3,04	1,54
Ortalama	43932,29	1,44	49,92	3,19	1,34
S. sapma	5618,21	0,07	6,42	0,14	0,19
Cv (%)	12,79	5,04	12,86	4,51	14,32
B ₄ C(0,3%)					
NBBWIC-1	41610,63	1,58	44,52	3,68	1,05
NBBWIC-2	42798,54	1,13	44,89	2,52	1,38
NBBWIC-3	43067,46	1,68	45,76	3,91	1,03
Ortalama	42492,21	1,47	45,06	3,37	1,15
S. sapma	775,22	0,29	0,64	0,75	0,20
Cv (%)	1,82	19,95	1,41	22,16	17,15
Katarası basma (aksiyal)-atkı kod	Kuvvet (N)	Uzama (mm)	Gerilme (MPa)	Uzama (%)	Katarası basma modülü (GPa)
Kontrol					
NBKIFIC-1	47728,66	1,55	52,12	3,38	1,25
NBKIFIC-2	40852,51	1,71	44,48	3,65	1,21
NBKIFIC-3	35232,36	1,74	38,78	3,87	1,09
Ortalama	41271,18	1,67	45,13	3,63	1,18
S. sapma	6258,66	0,10	6,69	0,25	0,08
Cv (%)	15,16	6,11	14,83	6,84	7,12
B ₄ C(0,3%)					
NBBIFIC-1	43663,96	1,44	47,01	3,12	1,39
NBBIFIC-2	44307,34	1,29	48,57	2,87	1,50
NBBIFIC-3	39893,83	1,31	41,89	2,88	1,40
Ortalama	42621,71	1,35	45,82	2,96	1,43
S. sapma	2384,22	0,08	3,49	0,14	0,06
Cv (%)	5,59	5,85	7,63	4,84	4,45



Şekil 3.15. Nano h-B₄C katkılı para-aramid/epoksi balistik plaka için statik katarası basma (aksiyal)-çözgü grafikleri. (a) Kontrol katarası basma (aksiyal) kuvvet-uzama, (b) Kontrol katarası basma (aksiyal) gerilme-uzama(%), (c) Nano h-B₄C katarası basma (aksiyal) kuvvet-uzama ve (d) Nano h-B₄C katarası basma (aksiyal) gerilme-uzama(%) grafikleri.



Şekil 3.16. Nano h-B₄C katkılı para-aramid/epoksi balistik plaka için statik katarası basma (aksiyal)-atki grafikleri. (a) Kontrol katarası basma (aksiyal) kuvvet-uzama, (b) Kontrol katarası basma (aksiyal) gerilme-uzama(%), (c) Nano h-B₄C katarası basma (aksiyal) kuvvet-uzama ve (d) Nano h-B₄C katarası basma (aksiyal) gerilme-uzama(%) grafikleri.

3.6. Katarası basma verileri (kalınlık)

Nano hegzogonal bor karbür katkılı (nh-B₄C) ve kontrol para-aramid/epoksi balistik plakalar üzerinde katarası basma testi(kalınlık) hem çözüğü ve hem de atkı yönünde yapılmıştır. Tablo 3.17’ de çözüğü ve atkı yönü nano h-B₄C katkılı para-aramid/epoksi balistik plaka için statik katarası kalınlık basma verileri verilmiştir. Böylelikle ana katmanların ki her biri, altı kumaş katmanından ve her plaka da sekiz adet katmandan oluşmuştur. Burada, sekiz katmanın birbirleri ile statik basma yükü altında kalınlık yönündeki dirençleri belirlenmiştir. Özellikle nano katkının etkileri dinamik balistik ve statik basma üzerinden değerlendirilip kontrol plakası ile kıyaslanmıştır. Elde edilen veriler nano bor karbür katkılı ve kontrol balistik plakaların çözüğü ve atkı yönleri için tablo formunda değerlendirilmiştir.

Tablo 3.17. Çözüğü ve atkı yönü nano B₄C katkılı para-aramid/epoksi balistik plaka için statik katarası kalınlık basma verileri.

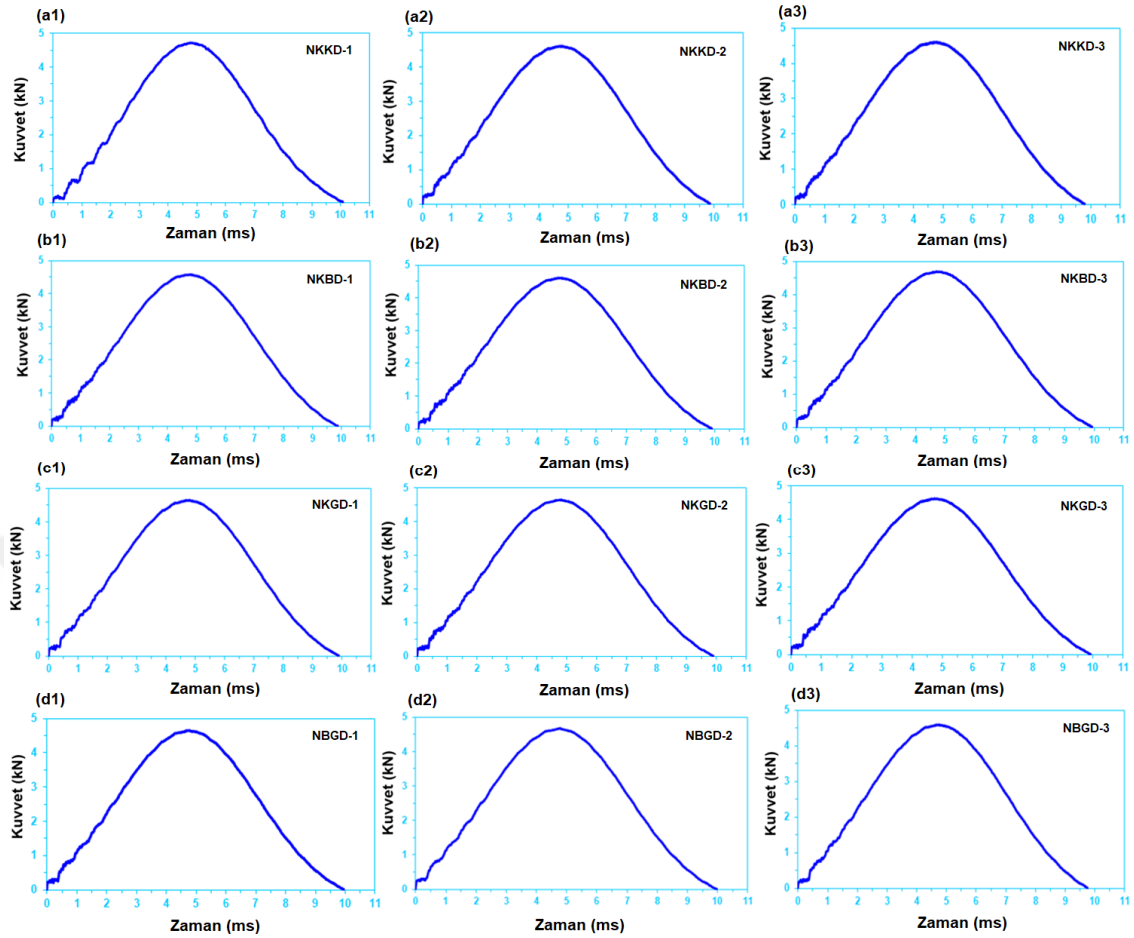
Katarası basma (kalınlık)- çözüğü kod	En x Boy x Kalınlık mm x mm x mm	Kuvvet (N)	Gerilme (MPa)	Kuvvet/hacim (GN/m ³)
Kontrol				
NBKWCT-1	31,50 x 40,00 x 27,26	812300	644,68	23,65
NBKWCT-2	31,50 x 36,00 x 27,33	500210	441,10	16,14
NBKWCT-3	31,50 x 37,50 x 27,46	820610	694,70	25,30
Ortalama	31,50 x 37,83 x 27,35	711040	593,49	21,70
S. sapma	0,00 x 2,02 x 0,10	182631,40	134,32	4,88
Cv (%)	0,00 x 5,34 x 0,37	25,69	22,63	22,50
B ₄ C(%0,3)				
NBBWCT-1	34,00 x 36,50 x 27,50	665530	536,29	19,50
NBBWCT-2	34,00 x 40,00 x 27,61	714210	525,15	19,02
NBBWCT-3	34,00 x 37,00 x 27,47	655140	520,78	18,96
Ortalama	34,00 x 37,83 x 27,52	678293,30	527,41	19,16
S. sapma	0,00 x 1,89 x 0,07	31535,59	7,99	0,30
Cv (%)	0,00 x 5,00 x 0,26	4,65	1,52	1,55
Katarası basma (kalınlık)-atkı kod	En x boy x kalınlık mm x mm x mm	Kuvvet (N)	Gerilme (MPa)	Kuvvet/hacim (GN/m ³)
Kontrol				
NBKFCT-1	33,00 x 38,00 x 27,23	817210	651,68	23,93
NBKFCT-2	33,00 x 37,00 x 27,24	801950	656,80	24,11
NBKFCT-3	33,00 x 36,00 x 27,23	737830	621,10	22,81
Ortalama	33,00 x 37,00 x 27,23	785663,30	643,18	23,62
S. sapma	0,00 x 1,00 x 0,01	42121,70	19,32	0,71
Cv (%)	0,00 x 2,70 x 0,02	5,36	3,00	2,99
B ₄ C(%0,3)				
NBBFCT-1	34,00 x 38,00 x 27,20	716560	554,61	20,39
NBBFCT-2	34,00 x 38,00 x 27,28	837310	648,07	23,76
NBBFCT-3	34,00 x 42,50 x 27,23	881840	610,27	22,41
Ortalama	34,00 x 39,50 x 27,23	811903,30	604,32	22,19
S. sapma	0,00 x 2,59 x 0,04	85518,97	47,01	1,69
Cv (%)	0,00 x 6,57 x 0,15	10,53	7,78	7,64

3.7. Ağırlık düşürme verileri (Düşük hız)

Nano hegzogonal bor karbür katkılı (nh-B₄C), grafen nano plaka katkılı (GNPs), hibrit nano malzeme katkılı (nh-B₄C ve GNPs) ve kontrol para-aramid/epoksi nano kompozitler üzerinde düşük hızda ağırlık düşürme testleri, özellikle nano katkının etkilerinin malzemedeki mikro-makro hasar üzerinden değerlendirmek amacı ile gerçekleştirilerek kontrol kompozitlerle kıyaslamalı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler nano kompozit ve kontrol kompozitler için tablo ve grafikler formunda verilmiştir. Burada, Tablo 3.18. de nano kompozit üzerine ağırlık düşürme sonucu elde edilen veriler ve Şekil 3.17(a1-d3)' de ise nano kompozitler üzerine ağırlık düşürme kuvvet (kN)-zaman (ms) grafikleri görülmektedir.

Tablo 3.18. Nano kompozit üzerine ağırlık düşürme sonucu elde edilen veriler.

Ağırlık düşürme kod	En x Boy x Kalınlık (mm x mm x mm)	Maksimum kuvvet (kN)	Kontak zaman- kuvvet (ms)	Sönümlenen enerji (J)	Kontak zaman- enerji (ms)	Bozulan üst alan x alt alan (mm ² x mm ²)
Kontrol						
NKKD-1	102 x 151 x 3,30	4,72	4,77	19,16	4,77	77,43 x 98,88
NKKD-2	102 x 151 x 3,32	4,63	4,79	19,44	4,79	77,60 x 83,47
NKKD-3	102 x 151 x 3,41	4,59	4,78	19,28	4,78	91,96 x 81,16
Ortalama	102 x 151 x 3,34	4,65	4,78	19,30	4,78	82,33 x 87,83
S. sapma	0,00 x 0,00 x 0,59	0,06	0,01	0,14	0,01	8,34 x 9,63
Cv (%)	0,00 x 0,00 x 1,75	1,37	0,24	0,73	0,24	10,13 x 10,96
B₄C (%0,3)						
NKBD-1	102 x 151 x 3,37	4,58	4,80	19,39	4,80	92,51 x 77,50
NKBD-2	102 x 151 x 3,25	4,62	4,85	19,52	4,85	76,55 x 80,19
NKBD-3	102 x 151 x 3,24	4,69	4,72	19,40	4,72	85,05 x 74,16
Ortalama	102 x 151 x 3,28	4,63	4,79	19,45	4,79	84,70 x 77,28
S. sapma	0,00 x 0,00 x 0,72	0,06	0,07	0,09	0,07	7,98 x 3,02
Cv (%)	0,00 x 0,00 x 2,20	1,27	1,40	0,46	1,40	9,42 x 3,90
GNPs (%0,3)						
NKGD-1	102 x 151 x 3,34	4,65	4,81	19,47	4,81	91,32 x 98,82
NKGD-2	102 x 151 x 3,28	4,65	4,82	19,48	4,82	83,99 x 84,17
NKGD-3	102 x 151 x 3,28	4,63	4,75	19,34	4,75	84,00 x 91,33
Ortalama	102 x 151 x 3,30	4,64	4,79	19,43	4,79	86,43 x 91,44
S. sapma	0,00 x 0,00 x 0,03	0,01	0,04	0,08	0,04	4,22 x 7,32
Cv (%)	0,00 x 0,00 x 1,05	0,20	0,83	0,39	0,83	4,89 x 8,01
B₄C(%0,3) +GNPs(%0,3)						
NBGD-1	103 x 151 x 3,23	4,64	4,79	19,16	4,79	87,87 x 96,82
NBGD-2	103 x 151 x 3,31	4,68	4,79	19,49	4,79	82,07 x 88,67
NBGD-3	103 x 151 x 3,34	4,59	4,77	19,35	4,77	92,31 x 78,46
Ortalama	103 x 151 x 3,29	4,64	4,78	19,33	4,78	87,41 x 87,98
S. sapma	0,00 x 0,00 x 0,06	0,05	0,01	0,16	0,01	5,13 x 9,19
Cv (%)	0,00 x 0,00 x 1,73	1,01	0,30	0,84	0,30	5,87 x 10,45



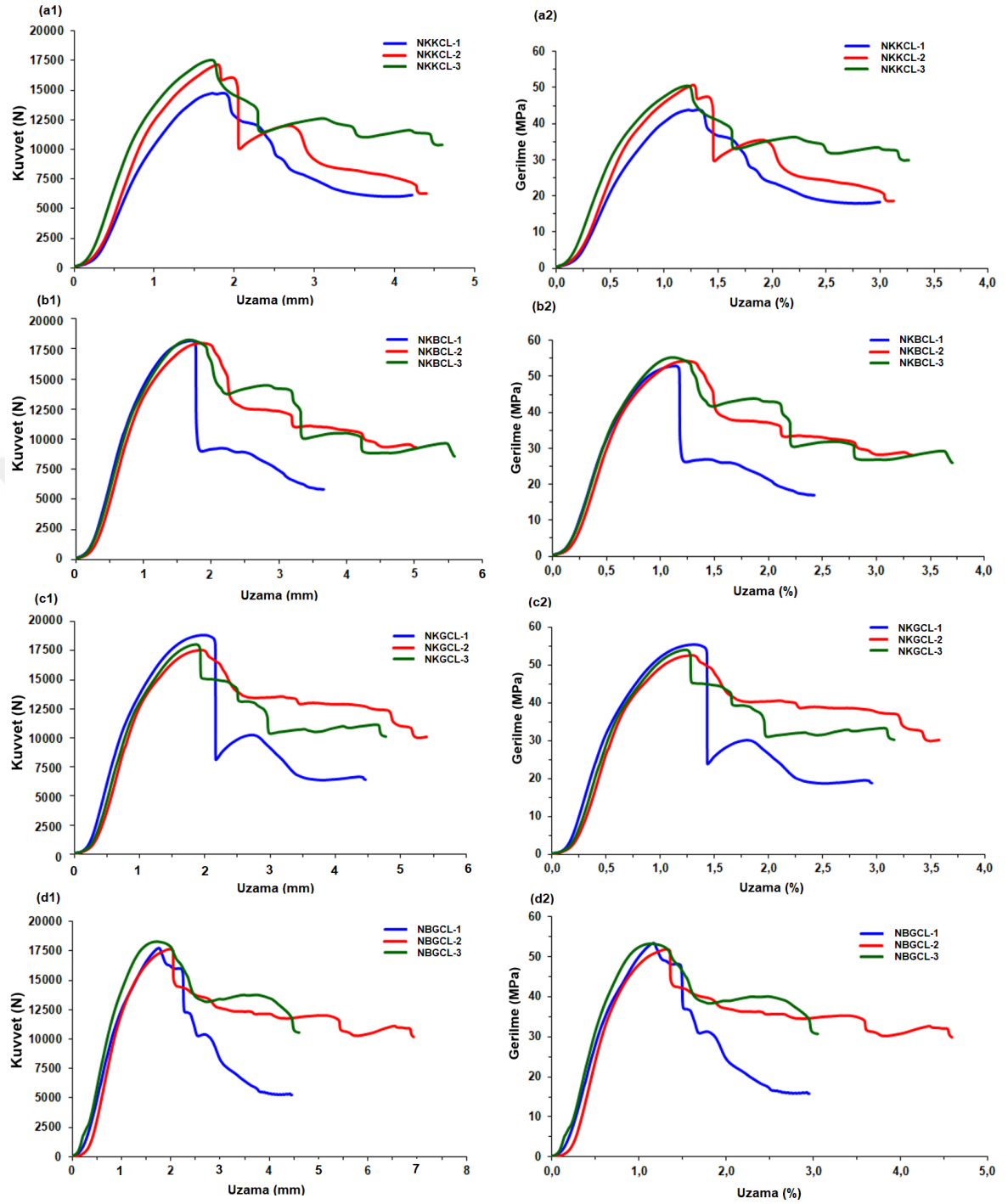
Şekil 3.17. Nano kompozitler üzerine ağırlık düşürme kuvvet(kN)-zaman(ms) grafikleri. (a1-a3) Kontrol p-aramid/epoksi kompozit, (b1-b3) Nano B₄C p-aramid/epoksi kompozit, (c1-c3) GNPs p-aramid/epoksi kompozit, (d1-d3) Hibrit nano (B₄C ve GNPs) kompozit.

3.8. Ağırlık düşürme sonrası basma verileri (CALVI)

Nano hegzogonal bor karbür katkılı (nh-B₄C), grafen nano plaka katkılı (GNPs), hibrit nano malzeme katkılı (nh-B₄C ve GNPs) ve kontrol para-aramid/epoksi nano kompozitler üzerinde düşük hızda ağırlık düşürme sonrası basma testleri yapılar özellikle nano katkının etkileri düşürmeden sonra statik basınç altında, malzemedeki mikro-makro hasar üzerinden değerlendirmek amacı ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler nano kompozit ve kontrol kompozitler için tablo ve grafikler formunda verilmiştir. Burada, Tablo 3.19’ de nano kompozit üzerine ağırlık düşürme sonrası basmayla elde edilen veriler ve Şekil 3.18(a1-d2)’ de ise nano kompozitler üzerine ağırlık düşürme sonrası basma kuvvet(N)-uzama(mm) ve gerilme(MPa)-uzama(%) grafikleri görülmektedir.

Tablo 3.19. Nano kompozit üzerine ağırlık düşürme sonrası basma (CALVI) sonucu elde edilen veriler.

Ağırlık düşürme sonrası basma kod	Kuvvet (N)	Uzama (mm)	Gerilme (MPa)	Uzama (%)	CALVI modül (GPa)	CALVI enerji (J)
Kontrol						
NKKCL-1	14761,74	1,86	43,86	1,23	4,27	32,20
NKKCL-2	17164,29	1,80	50,69	1,19	4,77	39,12
NKKCL-3	17335,76	1,71	50,46	1,13	5,78	45,63
Ortalama	16420,60	1,79	48,33	1,19	4,94	38,98
S. sapma	1439,17	0,08	3,88	0,05	0,77	6,71
Cv (%)	8,76	4,27	8,03	4,27	15,64	17,22
B₄C (%0,3)						
NKBCL-1	18186,34	1,70	52,91	1,13	5,63	32,92
NKBCL-2	17987,73	1,85	54,26	1,23	5,06	45,23
NKBCL-3	18260,63	1,67	55,25	1,10	5,54	47,80
Ortalama	18144,90	1,74	54,14	1,15	5,41	41,98
S. sapma	141,09	0,10	1,18	0,07	0,30	7,95
Cv (%)	0,78	5,65	2,18	5,65	5,60	18,94
GNPs(%0,3)						
NKGCL-1	18856,64	1,97	55,35	1,30	5,58	40,30
NKGCL-2	17574,02	1,95	52,53	1,29	4,56	47,98
NKGCL-3	18052,35	1,86	53,96	1,23	4,95	45,27
Ortalama	18161,00	1,93	53,95	1,28	5,03	44,52
S. sapma	648,18	0,06	1,41	0,04	0,51	3,89
Cv (%)	3,57	2,99	2,61	2,99	10,21	8,74
B₄C(%0,3) +GNPs(%0,3)						
NBGCL-1	17755,85	1,76	53,37	1,17	4,96	39,20
NBGCL-2	17658,43	1,99	51,79	1,32	4,36	46,53
NBGCL-3	18298,79	1,72	53,19	1,14	5,42	50,69
Ortalama	17904,36	1,82	52,79	1,21	4,91	45,47
S. sapma	345,04	0,14	0,86	0,09	0,53	5,81
Cv (%)	1,93	7,80	1,63	7,80	10,80	12,79



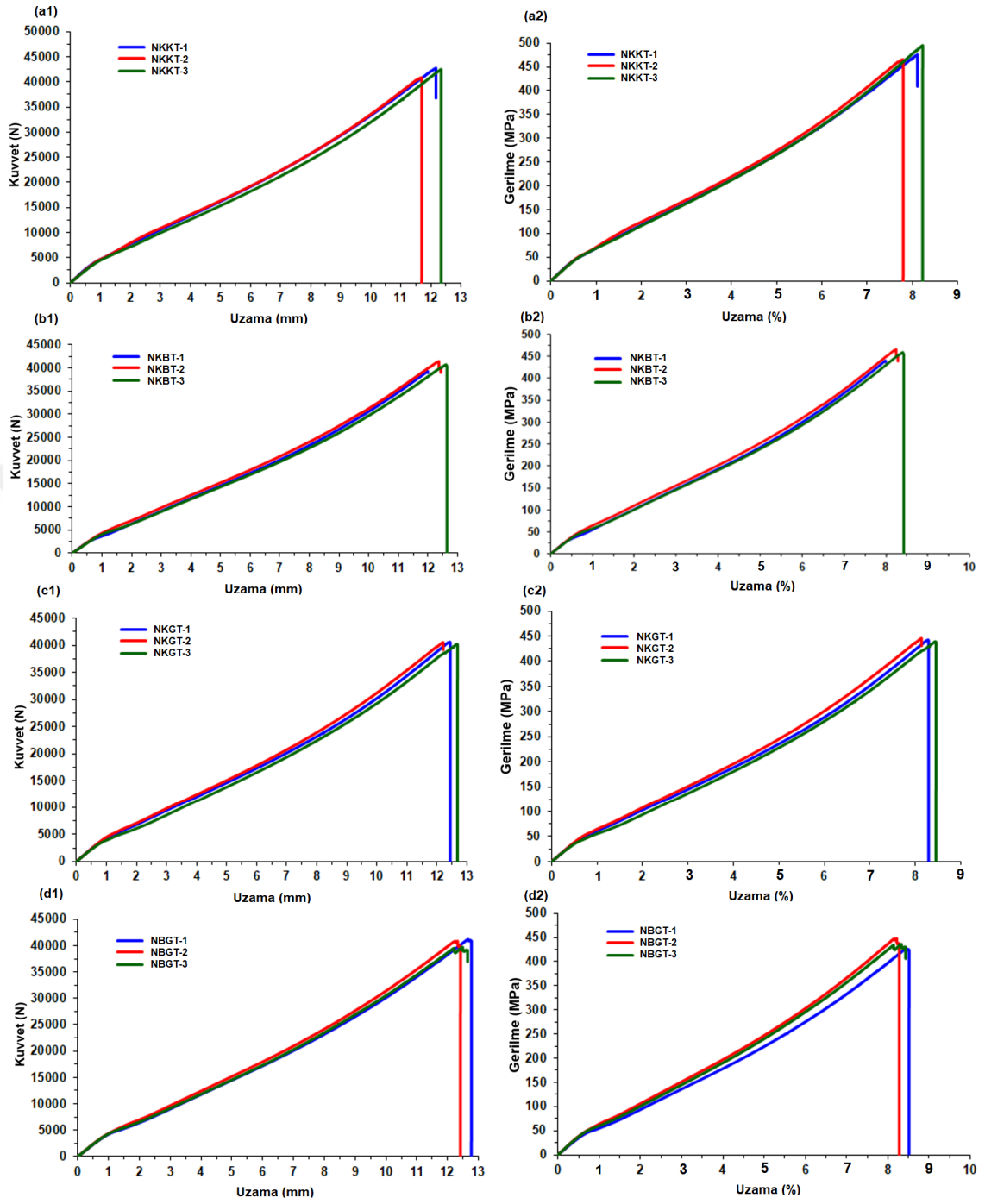
Şekil 3.18. Nano kompozitler üzerine ağırlık düşürme sonrası basma kuvvet(N)-uzama(mm) ve gerilme(MPa)-uzama(%) grafikleri. (a1-a2) Kontrol p-aramid/epoksi kompozit, (b1-b2) Nano B₄C p-aramid/epoksi kompozit, (c1-c2) GNPs p-aramid/epoksi kompozit, (d1-d2) Hibrit nano (B₄C ve GNPs) kompozit.

3.9. Çekme verileri

Nano hegzogonal bor karbür katkılı (nh-B₄C), grafen nano plaka katkılı (GNPs), hibrit nano malzeme katkılı (nh-B₄C ve GNPs) ve kontrol para-aramid/epoksi nano kompozitler üzerinde statik çekme testleri yapılarak özellikle nano katkının etkileri malzemedeki yük taşıma kapasitesi ve mikro-makro hasar üzerinden değerlendirmek amacı ile gerçekleştirilerek kontrol kompozitlerle kıyaslamalı olarak açıklanmıştır. Elde edilen veriler nano kompozit ve kontrol kompozitler için tablo ve grafikler formunda verilmiştir. Burada, Tablo 3.20’ de nano kompozit üzerine statik çekmeyle elde edilen veriler ve Şekil 3.19(a1-d2)’ de ise nano kompozitler üzerine statik çekme kuvvet(N)-uzama(mm) ve gerilme(MPa)-uzama(%) grafikleri görülmektedir. Gerilme-uzama eğrilerinden orantılı bölgeden (proportional region) çekme modül değeri (E_{ff}) bağıntı (2.12) göz önüne alınarak hesaplanmıştır. Öte yandan, orantılı bölgeden çıkıldığında ki bölge krimp uzama bölgesi olarak değerlendirilip bununla ilgili krimp uzama modülü (E_{ce}), bağıntı (2.12) göz önüne alınarak hesaplanmıştır. Krimp uzama geçildikten sonra ki bölge de iplik uzama modülü (E_{ye}) olarak göz önüne alınmıştır. Para-aramid/epoksi kompozit yapının ortalama çekme modül (E_{ort}) değeri olarak ise orantılı bölgeden elde edilen modül (E_{ff}) göz önüne alınarak belirlenmiştir [190].

Tablo 3.20. Nano kompozit üzerine statik çekme yükü sonucu elde edilen veriler.

Nanokompozit kod	Çekme kuvveti (N)	Çekme uzaması (mm)	Çekme gerilmesi (MPa)	Çekme uzaması (%)	Çekme modülü (GPa)			
					E _{ff}	E _{ce}	E _{ve}	E _{ort}
Kontrol								
NKKT-1	42750,21	12,17	475,48	8,11	8,93	5,74	5,87	-
NKKT-2	40843,26	11,68	465,45	7,79	8,69	5,68	5,81	-
NKKT-3	42507,83	12,34	495,08	8,23	8,49	5,36	5,77	-
Ortalama	42033,77	12,06	478,67	8,04	8,71	5,59	5,82	8,71
S. sapma	1038,11	0,34	15,07	0,23	0,22	0,21	0,05	0,22
Cv (%)	2,47	2,83	3,15	2,83	2,49	3,72	0,80	2,49
B4C(%0,3)								
NKBT-1	39236,55	11,99	440,37	7,99	7,80	4,96	5,36	-
NKBT-2	41390,92	12,36	465,96	8,24	7,74	5,20	5,49	-
NKBT-3	40692,45	12,60	459,49	8,40	7,39	4,82	5,29	-
Ortalama	40439,97	12,32	455,27	8,21	7,65	4,99	5,38	7,65
S. sapma	1099,15	0,31	13,31	0,21	0,22	0,19	0,10	0,22
Cv (%)	2,72	2,53	2,92	2,53	2,89	3,80	1,89	2,89
GNPs(%0,3)								
NKGT-1	40630,45	12,42	442,60	8,28	7,69	4,73	5,14	-
NKGT-2	40564,19	12,20	445,81	8,13	7,75	4,92	5,37	-
NKGT-3	40219,65	12,65	439,41	8,44	7,40	4,55	5,04	-
Ortalama	40471,43	12,43	442,61	8,28	7,61	4,73	5,18	7,61
S. sapma	220,55	0,23	3,20	0,15	0,19	0,18	0,17	3,20
Cv (%)	0,54	1,83	0,72	1,83	2,50	3,86	3,23	2,50
B4C(%0,3)+GNPs(%0,3)								
NBGT-1	41190,08	12,66	427,33	8,44	7,14	4,48	4,90	-
NBGT-2	40855,57	12,32	447,68	8,21	7,87	4,95	5,35	-
NBGT-3	39693,85	12,49	436,24	8,32	7,69	4,77	5,12	-
Ortalama	40579,83	12,49	437,08	8,33	7,57	4,73	5,12	7,57
S. sapma	785,30	0,17	10,20	0,11	0,38	0,24	0,22	0,38
Cv (%)	1,94	1,38	2,33	1,38	5,05	5,04	4,34	5,05



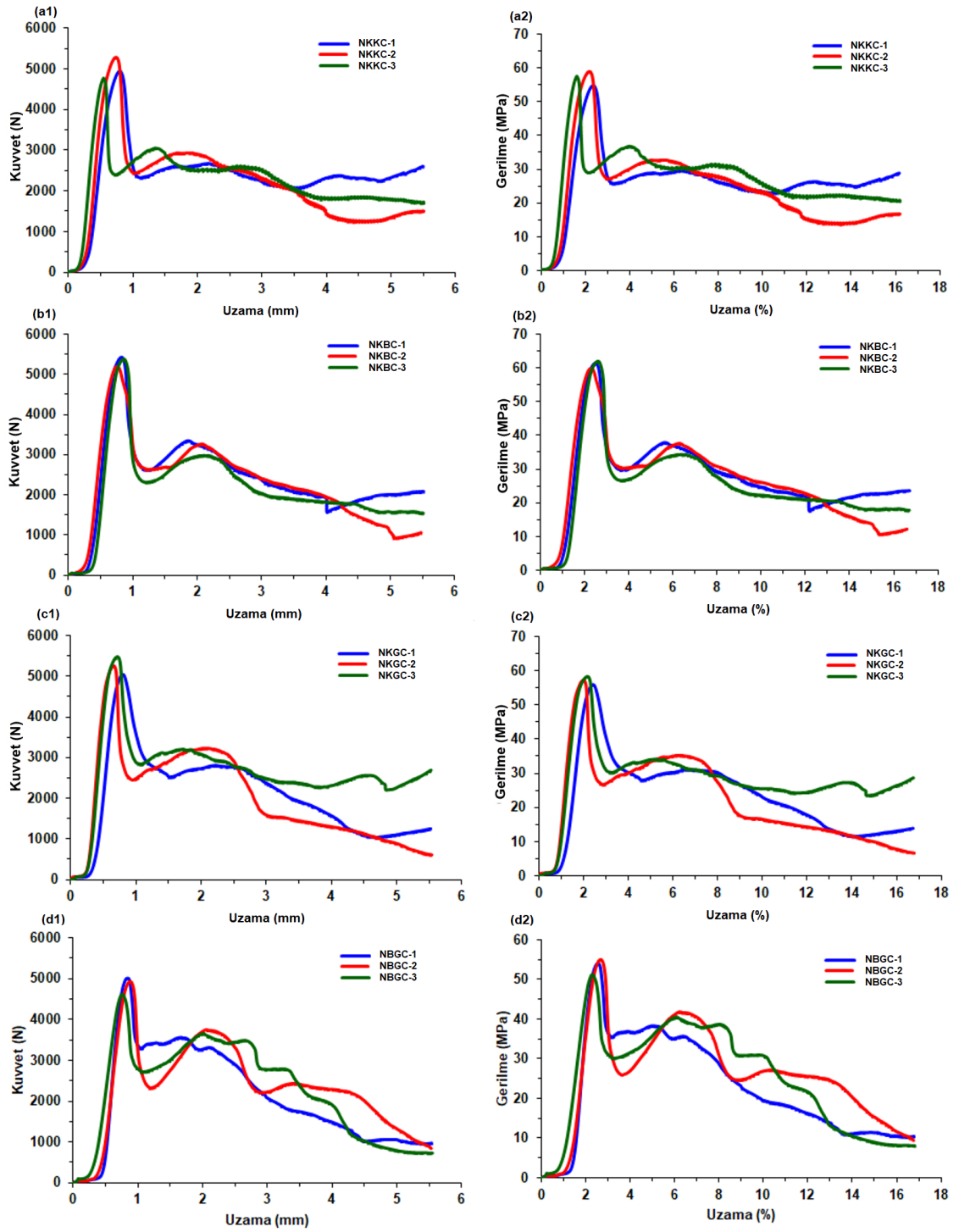
Şekil 3.19. Nano kompozitler üzerine statik çekme yükü sonrası kuvvet(N)-uzama(mm) ve gerilme(MPa)-uzama(%) grafikleri. (a1-a2) Kontrol p-aramid/epoksi kompozit, (b1-b2) Nano B₄C p-aramid/epoksi kompozit, (c1-c2) GNPs p-aramid/epoksi kompozit, (d1-d2) Hibrit nano (nh-B₄C ve GNPs) kompozit.

3.10. Basma verileri

Nano hegzogonal bor karbür katkılı (nh-B₄C), grafen nano plaka katkılı (GNPs), hibrit nano malzeme katkılı (nh-B₄C ve GNPs) ve kontrol para-aramid/epoksi nano kompozitler üzerinde statik basma testleri yapılarak özellikle nano katkının etkileri, malzemedeki yük taşıma kapasitesi ve mikro-makro hasar üzerinden değerlendirmek amacı ile gerçekleştirilerek kontrol kompozitlerle kıyaslamalı olarak açıklanmıştır. Elde edilen veriler nano kompozit ve kontrol kompozitler için tablo ve grafikler formunda verilmiştir. Burada, Tablo 3.21’ de nano kompozit üzerine statik basmayla elde edilen veriler ve Şekil 3.20(a1-d2)’ de ise nano kompozitler üzerine statik basma kuvvet(N)-uzama(mm) ve gerilme(MPa)-uzama(%) grafikleri görülmektedir.

Tablo 3.21. Nano kompozit üzerine statik basma yükü sonucu elde edilen veriler.

Nanokompozit kod	Basma kuvveti (N)	Basma uzaması (mm)	Basma gerilmesi (MPa)	Basma uzaması (%)	Basma modülü (GPa)
Kontrol					
NKKC-1	4937,49	0,80	54,75	2,35	2,07
NKKC-2	5280,58	0,74	58,91	2,18	2,39
NKKC-3	4766,58	0,55	57,50	1,61	3,00
Ortalama	4994,88	0,70	57,06	2,05	2,49
S. sapma	261,77	0,13	2,11	0,39	0,47
Cv (%)	5,24	18,96	3,71	18,96	19,09
B4C(%0,3)					
NKBC-1	5425,18	0,83	61,37	2,52	1,89
NKBC-2	5194,08	0,76	59,81	2,30	2,12
NKBC-3	5380,79	0,86	61,96	2,61	1,73
Ortalama	5333,35	0,82	61,05	2,48	1,91
S. sapma	122,64	0,05	1,11	0,16	0,19
Cv (%)	2,30	6,47	1,82	6,47	10,17
GNPs(%0,3)					
NKGC-1	5042,41	0,80	55,91	2,43	1,79
NKGC-2	5256,04	0,66	57,26	2,01	2,43
NKGC-3	5478,61	0,72	58,31	2,18	2,25
Ortalama	5259,02	0,73	57,16	2,21	2,15
S. sapma	218,12	0,07	1,20	0,21	0,33
Cv (%)	4,15	9,61	2,10	9,61	15,32
B4C(%0,3)+GNPs(%0,3)					
NBGC-1	5011,38	0,85	53,96	2,57	1,59
NBGC-2	4929,89	0,88	55,00	2,68	1,56
NBGC-3	4616,38	0,76	51,19	2,31	1,80
Ortalama	4852,55	0,83	53,38	2,52	1,65
S. sapma	208,55	0,06	1,97	0,19	0,13
Cv (%)	4,30	7,52	3,68	7,52	8,04



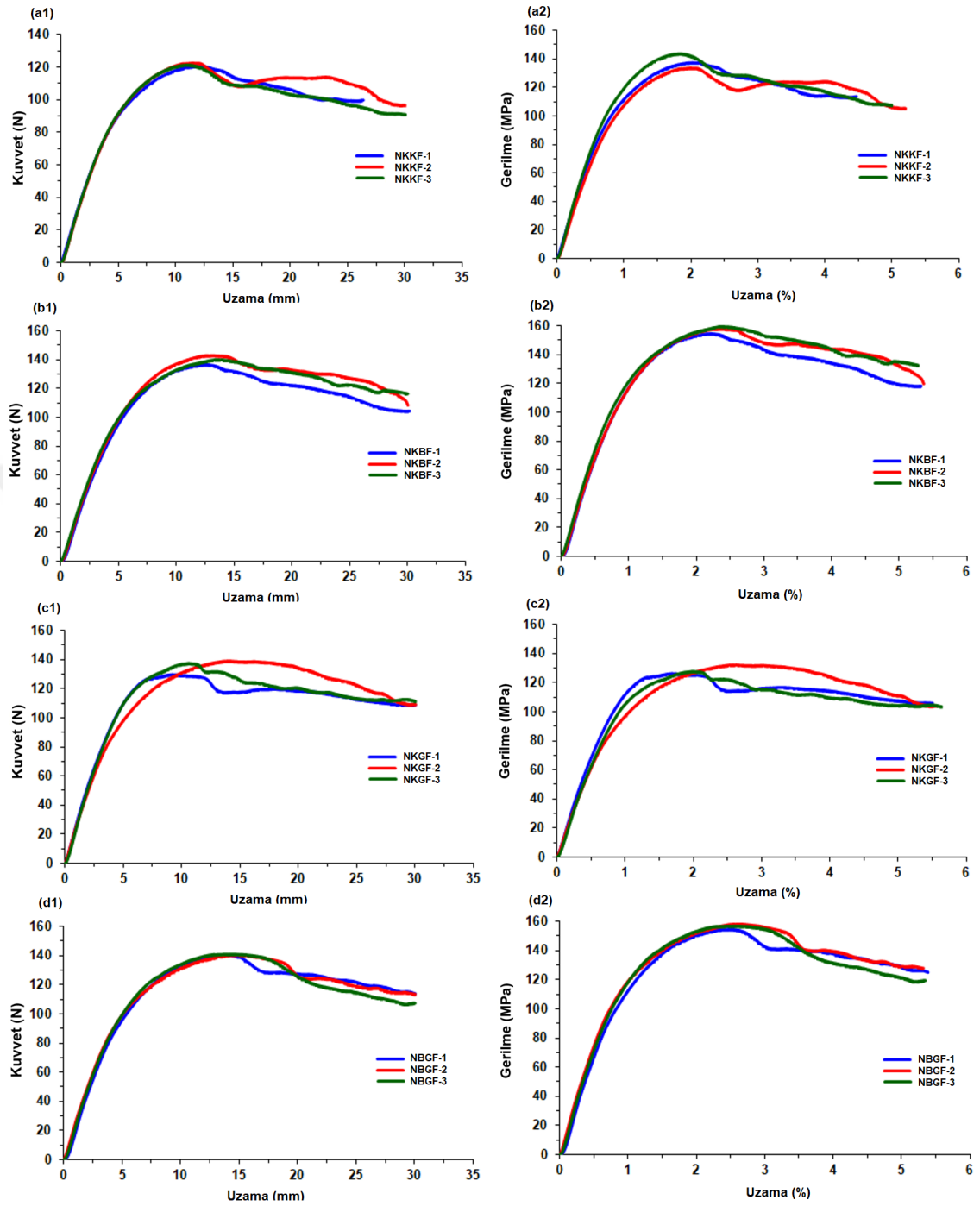
Şekil 3.20. Nano kompozitler üzerine statik basma yükü sonrası kuvvet(N)-uzama(mm) ve gerilme(MPa)-uzama(%) grafikleri. (a1-a2) Kontrol p-aramid/epoksi kompozit, (b1-b2) Nano h-B₄C p-aramid/epoksi kompozit, (c1-c2) GNPs p-aramid/epoksi kompozit, (d1-d2) Hibrit nano (h-B₄C ve GNPs) kompozit.

3.11. Eğilme verileri

Nano hegzogonal bor karbür katkılı (nh-B₄C), grafen nano plaka katkılı (GNPs), hibrit nano malzeme katkılı (nh-B₄C ve GNPs) ve kontrol para-aramid/epoksi nano kompozitler üzerinde statik eğilme testleri yapılarak özellikle nano katkının etkileri, malzemedeki yük taşıma kapasitesi ve mikro-makro hasar üzerinden değerlendirmek amacı ile gerçekleştirilerek kontrol kompozitlerle kıyaslamalı olarak açıklanmıştır. Elde edilen veriler nano kompozit ve kontrol kompozitler için tablo ve grafikler formunda verilmiştir. Burada, Tablo 3.22’ de nano kompozit üzerine statik eğilmeyle elde edilen veriler ve Şekil 3.21(a1-d2)’ de ise nano kompozitler üzerine statik eğilme kuvvet(N)-uzama(mm) ve gerilme(MPa)-uzama(%) grafikleri görülmektedir.

Tablo 3.22. Nano kompozit üzerine statik eğilme yükü sonucu elde edilen veriler.

Nanokompozit kod	Eğilme kuvveti (maksimum) (N)	Eğilme uzaması (mm)	Eğilme gerilmesi (MPa)	Eğilme uzaması (%)	Eğilme modülü (GPa)
Kontrol					
NKKF-1	120,54	11,92	137,44	2,02	14,38
NKKF-2	122,44	11,45	133,61	1,98	13,93
NKKF-3	121,26	11,03	143,69	1,83	14,38
Ortalama	121,41	11,47	138,25	1,95	14,23
S. sapma	0,96	0,45	5,09	0,10	0,26
Cv (%)	0,79	3,89	3,68	5,09	1,84
B4C(%0,3)					
NKBF-1	136,50	12,58	154,60	2,22	15,75
NKBF-2	142,97	13,14	158,05	2,35	15,32
NKBF-3	140,10	13,33	159,65	2,35	17,09
Ortalama	139,86	13,02	157,43	2,30	16,05
S. sapma	3,24	0,39	2,58	0,07	0,92
Cv (%)	2,32	3,01	1,64	3,18	5,74
GNPs(%0,3)					
NKGF-1	140,68	129,75	126,25	1,68	14,64
NKGF-2	140,52	139,08	132,20	2,63	12,53
NKGF-3	141,04	137,50	127,72	2,00	15,02
Ortalama	140,75	135,44	128,72	2,10	14,06
S. sapma	0,26	4,99	3,10	0,48	1,34
Cv (%)	0,19	3,69	2,41	23,03	9,53
B4C(%0,3)+GNPs(%0,3)					
NBGF-1	140,68	13,72	154,58	2,46	15,99
NBGF-2	140,52	14,94	158,19	2,64	15,43
NBGF-3	141,04	13,69	156,86	2,44	16,28
Ortalama	140,75	14,12	156,54	2,51	15,90
S. sapma	0,26	0,71	1,82	0,11	0,43
Cv (%)	0,19	5,05	1,16	4,53	2,72



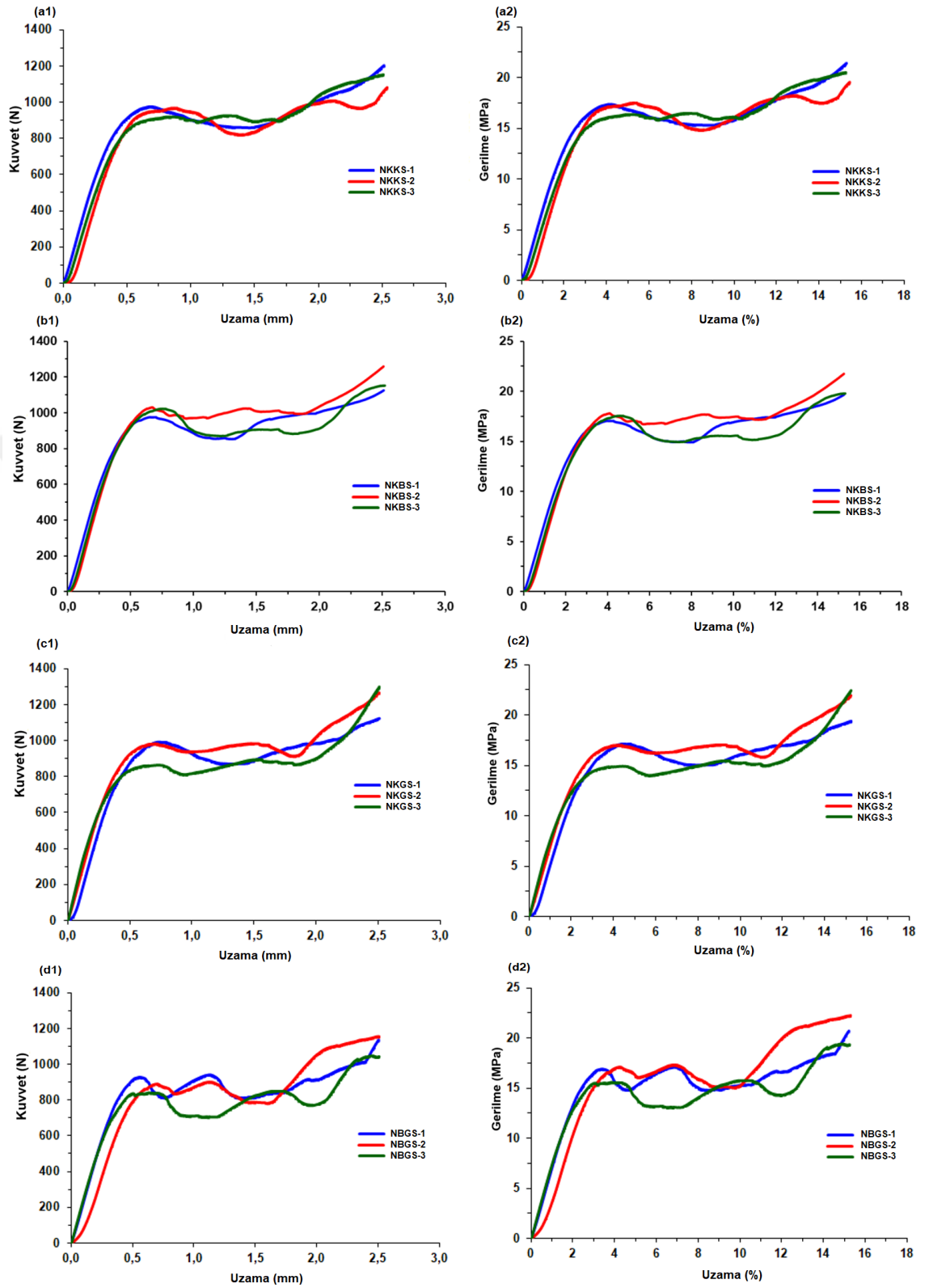
Şekil 3.21. Nano kompozitler üzerine statik eğilme yükü sonrası kuvvet(N)-uzama(mm) ve gerilme(MPa)-uzama(%) grafikleri. (a1-a2) Kontrol p-aramid/epoksi kompozit, (b1-b2) Nano h-B₄C p-aramid/epoksi kompozit, (c1-c2) GNPs p-aramid/epoksi kompozit, (d1-d2) Hibrit nano (h-B₄C ve GNPs) kompozit.

3.12. Katarası kayma dayanımı (Short beam) verileri

Nano hegzogonal bor karbür katkılı (nh-B₄C), grafen nano plaka katkılı (GNPs), hibrit nano malzeme katkılı (nh-B₄C ve GNPs) ve kontrol para-aramid/epoksi nano kompozitler üzerinde statik katarası kayma dayanımı testleri yapılarak özellikle nano katkının etkileri, malzemedeki yük taşıma kapasitesi ve mikro-makro hasar üzerinden değerlendirmek amacı ile gerçekleştirilerek kontrol kompozitlerle kıyaslamalı olarak açıklanmıştır. Elde edilen veriler nano kompozit ve kontrol kompozitler için tablo ve grafikler formunda verilmiştir. Burada, Tablo 3.23’ de nano kompozit üzerine statik katarası kayma ile elde edilen veriler ve Şekil 3.22(a1-d2)’ de ise nano kompozitler üzerine statik katarası kayma kuvvet(N)-uzama(mm) ve katarası kayma dayanımı(MPa)-uzama(%) grafikleri görülmektedir.

Tablo 3. 23. Nano kompozit üzerine statik katarası kayma yükü sonucu elde edilen veriler.

Nanokompozit kod	Katarası kayma kuvveti (N)	Katarası kayma uzaması (mm)	Katarası kayma dayanımı (MPa)	Katarası kayma uzaması (%)	Katarası kayma modülü (GPa)
Kontrol					
NKKS-1	975,71	0,69	17,37	4,19	0,69
NKKS-2	967,92	0,87	17,51	5,30	0,50
NKKS-3	925,62	1,27	16,48	7,73	0,57
Ortalama	956,42	0,94	17,12	5,74	0,59
S. sapma	26,95	0,30	0,56	1,81	0,10
Cv (%)	2,82	31,55	3,25	31,55	16,93
B4C(%0,3)					
NKBS-1	981,43	1,76	17,16	10,69	0,69
NKBS-2	1030,87	0,67	17,81	4,09	0,56
NKBS-3	1022,58	0,75	17,56	4,58	0,60
Ortalama	1011,62	1,06	17,51	6,45	0,61
S. sapma	26,48	0,61	0,33	3,68	0,07
Cv (%)	2,62	57,00	1,87	57,00	11,13
GNPs(%0,3)					
NKGS-1	992,15	0,74	17,14	4,52	0,53
NKGS-2	983,64	1,47	17,04	8,93	0,68
NKGS-3	895,43	1,53	15,47	9,31	0,77
Ortalama	957,07	1,25	16,55	7,59	0,66
S. sapma	53,55	0,44	0,94	2,66	0,12
Cv (%)	5,60	35,11	5,67	35,11	18,10
B4C(%0,3)+GNPs(%0,3)					
NBGS-1	941,40	1,13	17,15	6,89	0,69
NBGS-2	901,23	1,13	17,33	6,85	0,46
NBGS-3	849,33	1,64	15,75	9,98	0,72
Ortalama	897,32	1,30	16,75	7,91	0,62
S. sapma	46,16	0,30	0,87	1,80	0,15
Cv (%)	5,14	22,73	5,17	22,73	23,58



Şekil 3.22. Nano kompozitler üzerine statik katarası kayma yükü sonrası kuvvet(N)-uzama(mm) ve gerilme(MPa)-uzama(%) grafikleri. (a1-a2) Kontrol p-aramid/epoksi kompozit, (b1-b2) Nano h-B₄C p-aramid/epoksi kompozit, (c1-c2) GNPs p-aramid/epoksi kompozit, (d1-d2) Hibrit nano (h-B₄C ve GNPs) kompozit.

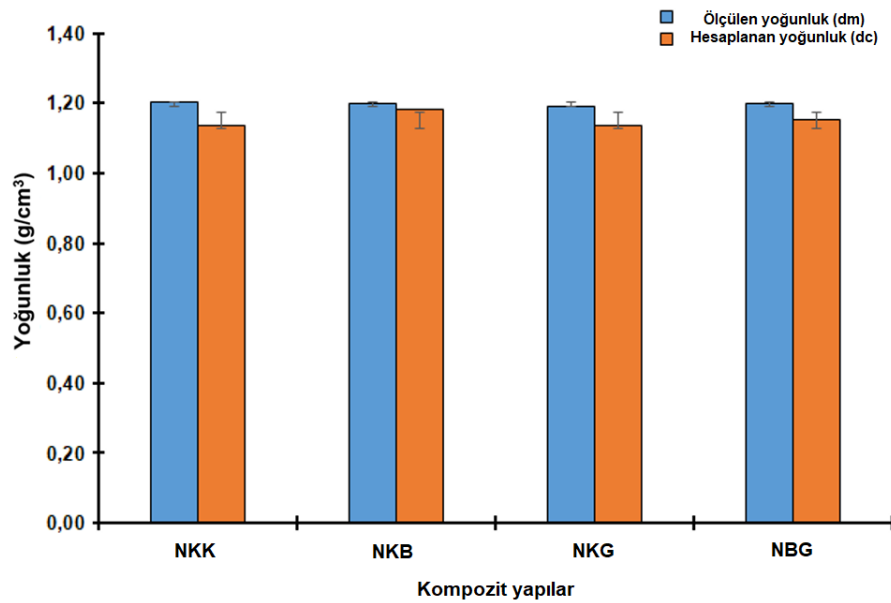
4. BÖLÜM

TARTIŞMA-SONUÇ VE ÖNERİLER

4.1.Tartışma

4.1.1. Para-aramid/epoksi nano kompozit yoğunluk sonuçları

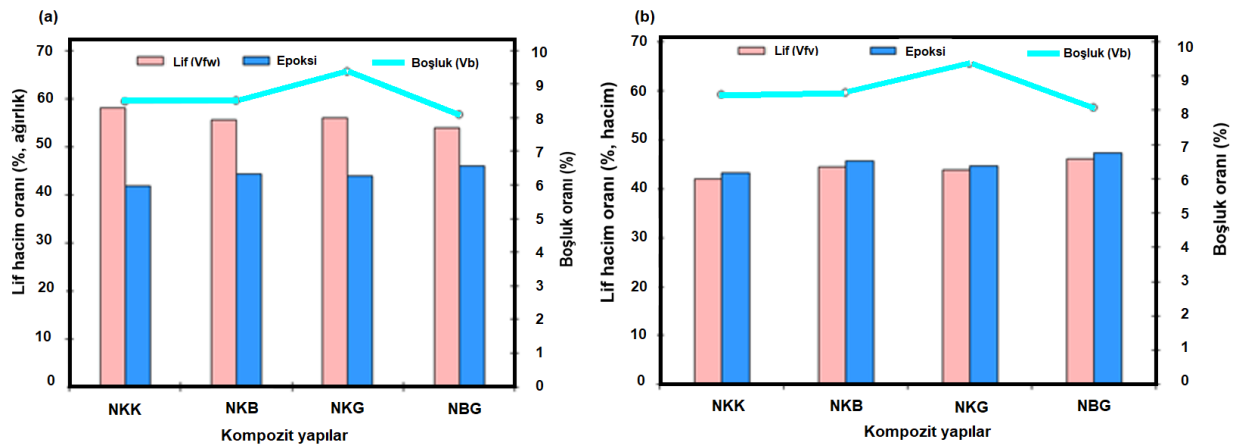
Nano hegzagonal bor karbür (NKB), grafen nano plaka katkılı(NKG) ve nano hibrit p-aramid/epoksi(NBG) ve kontrol(NKK) kompozitlerin yoğunluk değer aralıkları 1,14-1,20 g/cm³ olup maksimum yoğunluk farklılığı %4,16 gibi ihmal edilebilir değerde çıkarak nano kompozitlerin hatasız üretildiği anlaşılmıştır. Bu sonuçlar Şekil 4.1’de görülmektedir. Ayrıca hesaplanan (d_c) ve ölçülen (d_m) yoğunluk değerlerinin de birbirlerine yakın sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.



Şekil 4.1. Para-aramid/epoksi nanokompozit yapıların yoğunluk sonuçları.

4.1.2. Para-aramid/epoksi nano kompozit lif hacim sonuçları

Nano hegzagonal bor karbür (NKB), grafen nano plaka katkılı(NKG) ve nano hibrit p-aramid/epoksi(NBG) ve kontrol(NKK) kompozitlerin lif hacim değer aralıkları ağırlık esaslı (Vfw) ve hacim esaslı (Vfv) olarak sırası ile %53,87-58,12 ve %44,57-48,26 olup ortalama nano kompozit ağırlık esaslı lif hacimleri üzerinden %2,30 ve hacim esaslı lif hacimleri üzerinden %6,90'lık bir farklılık ortaya çıktığı hesaplanmıştır. Şekil 4.2(a-b)'de lif hacim ve epoksi nin ağırlık ve hacimsel değerleri boşluk oranları ile birlikte görülmektedir. Lif hacim değerlerindeki farklılıkların nedeni, nano parçacıkların epoksi ve filamentlerle kumaş yapısı içinde yaptıkları etkileşimler sonucu ortaya çıktığı şeklinde yorumlanmıştır. Örneğin, çözgü ve atkı ipliklerin kesişme bölgelerindeki düzensizlik, filament-filament arasındaki iplik çevresindeki ve iplik merkezindeki konumlanmanın bu düzensizlikleri artırarak nano katkılı kompozitlerde düşük değerde lif hacim değişimlerine yol açtığı öne sürülmüştür. Bu düzensizlik yapıların bozunma modlarından elde edilen görüntülerde de kısmen kendini göstermiştir. Öte yandan, NKB, NKG, NBG ve NKK kompozitlerin boşluk oranı %8,08-9,35 aralığında olup ortalama nano kompozit boşluk oranları üzerinden %2,19 gibi bir farklılık ortaya çıktığı anlaşılmıştır. Bu tartışmalardan geliştirilen nano kompozitlerin test edilebilir ve bunlardan güvenilir verilerin üretileceği sonucu çıkarılmıştır.



Şekil 4.2. Para-aramid/epoksi nanokompozit yapıların lif hacim sonuçları. (a) Ağırlık esaslı lif hacmi ve (b) Hacim esaslı lif hacmi.

4.1.3. Nano pull-out sonuçları

4.1.3.1. Nano kaplama, CVD ve PECVD işlemleri soft para-aramid kumaş yapılarının analitik karakterizasyon sonuçları

4.1.3.1.1. FESEM ve EDX sonuçları

Nano kaplama soft para-aramid kumaşların FESEM görüntüleri Şekil 3.1(a-h)'de gösterildiği üzere, para-aramid bezayağı dokuma kumaşın (Şekil 3.1g ve h), nh-B₄C, MWCNTs ve GNPs ile kaplanması sonucunda, çoklu filament yüzeyleri boyunca düzenli bir nanoparçacık dağılımı sergilediği gözlenmiştir (sırasıyla Şekil 3.1b, d, f). Çözgü demetinin detaylı incelenmesi sonucunda, filament yüzeylerinin tamamen nanoparçacıklarla kaplandığı tespit edilmiştir. Yüksek büyütme görüntüleri, filament yüzeyleri boyunca homojen bir nanoparçacık dağılımını teyit etmektedir. Dikkat çekici olarak, nh-B₄C parçacıkların yığın kütleler halinde, MWCNT'lerin dolaşık tüpler biçiminde ve GNP'lerin çöküntü benzeri (çukurumsu) yapılar şeklinde minimal düzeyde topaklanma (agglomeration) sergilediği tespit edilmiştir.

Nano kaplama kumaşların EDX verilerinin Şekil 3.2(a-d)'de gösterildiği üzere, nh-B₄C kaplı kumaşın EDX spektrumu, bor (B, %21,15 ağırlıkça) ve karbon (C, %68,94 ağırlıkça) için belirgin pikler sergilemiş olup, yüksek bor-karbon yoğunluk oranları, p-aramid yüzeyinde etkili nh-B₄C birikimini göstermektedir (Şekil 3.2a). Öte yandan, MWCNTs ve GNPs kaplı kumaşların spektrumları, kaplanmamış p-aramide kıyasla karbon pikinde bir artış göstermiş olup, bu oran sırasıyla %67,37'den %69,94'e ve %70,54'e yükselmiştir (Şekil 3.2b-d). Sonuç olarak, karbon pikleri kontrol ve kaplanmış kumaşlar arasında farklılık göstermektedir. Kumaşların farklı bölgelerindeki spektrumlarda tutarlı element oranları, kaplamanın homojen bir şekilde dağıldığını ortaya koymaktadır.

Öte yandan, karbon nanotüp büyütme (CVD), plazma uygulanmış (PECVD) ve kimyasal kaplaması uzaklaştırılmış soft para-aramid kumaşların FESEM görüntüleri Şekil 3.8(a-f)'de gösterildiği üzere, para-aramid kumaşın (Şekil 3.1g ve h), CVD işlemi ile filament yüzeyinde karbon nanotüplerin belirli yoğunluk ve boyutta büyütüldüğü görülmektedir (Şekil 3.8a,d). Ayrıca, plazma işlemi ile filamentlerde belirli bir pürüzlülüğün gerçekleştiği filamentlerdeki mikro bozunmalarla kendisini göstermiştir

(Şekil 3.8b,e). Yüzey kimyasalı uzaklaştırılmış kumaşın üst yüzey görüntüsünden filamentlerde ihmal edilebilir bir bozunma gerçekleştiği tespit edilmiştir (Şekil 3.8c,f).

CVD, PECVD ve kimyasalı uzaklaştırılarak işlem görmüş kumaşların EDX verilerinin Şekil 3.9(a-c)'de gösterildiği üzere, CVD kumaşın EDX spektrumu, karbon (C, %65,99 ağırlıkça), azot (N, %13,59 ağırlıkça), oksijen (O,%18,49), demir (Fe,%1,45) ve kobalt (Co,%0,48) için belirgin pikler sergilemiş olup, yüksek karbon yoğunluk oranları, p-aramid yüzeyinde etkili CNTs birikimini göstermektedir (Şekil 3.9a). Öte yandan, PECVD ve kimyasalı uzaklaştırma işlemli kumaşların spektrumları, kontrol p-aramide kıyasla karbon pikinde bir artış göstermiş olup, bu oran sırasıyla %67,37'den %72,50'e ve %68,14'e yükselmiştir (Şekil 3.9b,c). Sonuç olarak, karbon pikleri kontrol ve işlemli kumaşlar arasında farklılık göstermektedir. Kumaşların farklı bölgelerindeki spektrumlarda tutarlı element oranları, işlemlerin homojen bir şekilde dağıldığını ortaya koymaktadır.

4.1.3.1.2. FTIR sonuçları

Nano kaplama soft para-aramid kumaşların FTIR sonuçları kıyaslamalı olarak tartışılmıştır. Nano bor karbür (nh-B₄C) kaplı p-aramid kumaşın FTIR spektrumunda, 2839 cm⁻¹'deki pik, simetrik C-H gerilme titreşimi ile ilişkilidir. 2296 cm⁻¹'deki pik ise B₄C yapısındaki bor-karbon üçlü bağına özgü B≡C gerilme titreşimine karşılık gelmektedir. Etanol işlemi yüzey kimyasını kısmen etkilese de, bu pik B₄C'nin varlığını göstermeye devam etmektedir (Şekil 3.3a). Buna ek olarak, 1636 cm⁻¹ ve 1530 cm⁻¹'deki pikler sırasıyla amid gruplarındaki C=O gerilme titreşimleri ile para-aramid yapısındaki N-H bükülme ve C-N gerilme titreşimlerine karşılık gelmekte olup, güçlü ve ayırt edici özelliklerini korumaktadır. Ayrıca, 1386 cm⁻¹ ve 1288 cm⁻¹'deki pikler sırasıyla aromatik amin yapısındaki C-N gerilme titreşimleri ile para-aramid lifinin aromatik halkalarındaki C-N gerilme ve C-H bükülme titreşimlerine karşılık gelmektedir. Etanol işlemi, yüzey etkileşimlerine bağlı olarak bu piklerde hafif değişimlere neden olabilir (Şekil 3.3a). Bunun yanı sıra, 1050 cm⁻¹, 810 cm⁻¹ ve 637 cm⁻¹'deki pikler muhtemelen B₄C kaplamasındaki C-O gerilme veya B-C gerilme titreşimlerine, aromatik halkalardaki C-H bağlarının düzlem dışı bükülme titreşimlerine, B₄C içindeki B-C bükülme titreşimlerine veya para-aramid yapısındaki C-H düzlem dışı bükülme titreşimlerine karşılık gelmektedir. Etanol işlemi, lifle olan etkileşime bağlı olarak bu pikleri kısmen

değiştirebilir (Şekil 3.3a). FTIR spektrumundan görüleceği üzere nano bor karbürle para-aramid filamentler fiziksel bir etkileşime girerek nano parçacıklar kendilerine filament yüzeyinde muhtemelen zayıf Van der Waals kuvvetleri üzerinden tutunmuşlardır.

MWCNTs kaplı p-aramid kumaşın FTIR spektrumunda, 1632 cm^{-1} ve 1501 cm^{-1} 'deki pikler sırasıyla amid gruplarında yer alan C=O gerilme titreşimleri ile para-aramid lif yapısındaki N-H bükülme ve C-N gerilme titreşimlerine karşılık gelmektedir. Buna ek olarak, 1388 cm^{-1} 'deki pik, para-aramid lifinin aromatik amin yapısındaki C-N gerilme titreşimleri ile ilişkilidir ve aynı zamanda lif yüzeyi ile etanol işlemi arasındaki etkileşimlerden kaynaklandığı ileri sürülebilir (Şekil 3.3b). Öte yandan, 1294 cm^{-1} ve 1002 cm^{-1} 'deki pikler, para-aramid yapısındaki aromatik halkalarda meydana gelen C-N gerilme ve C-H bükülme titreşimlerine karşılık gelmektedir. MWCNT'lerin varlığı, bu piklerin yoğunluğunu etkileyebilir. 814 cm^{-1} ve 611 cm^{-1} 'deki pikler tipik olarak aromatik halkalardaki C-H bağlarının düzlem dışı bükülme titreşimlerine ve para-aramid yapısındaki C-C bükülme titreşimlerine karşılık gelmektedir. MWCNT'ler ile olan etkileşim, pik yoğunluğunda hafif değişimlere neden olabilir (Şekil 3.3b). Bunun yanı sıra, 512 cm^{-1} ve 428 cm^{-1} 'deki pikler sırasıyla para-aramid lifindeki amid bağı (C-N-C) bükülme titreşimleri ile MWCNT'lerdeki düşük frekanslı titreşimlere karşılık gelmekte olup, bu durum MWCNT'ler ile lif arasındaki etkileşimleri yansıtabilir (Şekil 3.3b). Bu pik atamaları, etanol işleminin MWCNT'ler üzerindeki potansiyel etkisini ve bunların para-aramid lifi ile olan etkileşimlerini dikkate almaktadır. Etanol, yüzey etkileşim bölgesinin reaktivitesini artırabilir. Yüzey kimyasında belirgin değişikliklere neden olması beklenmese de, yüzey alanı içinde güçlü fiziksel etkileşimleri teşvik ettiği öngörülmektedir. Bu işlemlerin tamamlanmasının ardından, etanol çevreden uzaklaştırılmaktadır.

GNPs kaplı p-aramid kumaşın FTIR spektrumunda, 1629 cm^{-1} ve 1508 cm^{-1} 'deki pikler sırasıyla C=O gerilme titreşimleri ile para-aramid yapısındaki amid gruplarına ait N-H bükülme ve C-N gerilme titreşimlerine karşılık gelmektedir. GNP'lerin varlığı bu pik üzerinde hafif bir etkiye sahip olabilir, ancak amid bağlarının karakteristik özelliğini korumaktadır (Şekil 3.3c). Ek olarak, 1380 cm^{-1} ve 1290 cm^{-1} 'deki pikler sırasıyla C-N gerilme titreşimlerine ve para-aramid lifinin aromatik amin gruplarında meydana gelen C-N gerilme ve C-H bükülme titreşimlerine karşılık gelmektedir. Etanol ile işlenmiş GNP'lerin varlığı, bu piklerde hafif kaymalara veya yoğunluk değişimlerine neden

olabilir (Şekil 3.3c). Ayrıca, 1078 cm^{-1} 'deki pik, GNP'lerin grafen yapısındaki C-C gerilme titreşimleri ile ilişkilendirilebilir ve bunların lif yüzeyinde bulunduğunu göstermektedir. 817 cm^{-1} 'deki pik, para-aramid yapısındaki aromatik halkalarda C-H bağlarının düzlem dışı bükülme titreşimleri ile ilişkilidir (Şekil 3.3c). GNP'ler ile olan etkileşim, bu piki kısmen değiştirebilir ve kaplamanın etkisini yansıtabilir. Genel spektral özellikler, hem para-aramid liflerinin özelliklerini hem de GNP kaplamasının etkisini yansıtmaktadır.

Sonuç olarak, bu pik atamaları, nh-B₄C, MWCNT'ler ve GNP'ler ile kaplanmış para-aramid lif yapısı üzerindeki ultrasonik banyo, sabit sıcaklık altında tekrarlanan basınç uygulaması ve etanol işleminin potansiyel etkilerini dikkate almaktadır. Uygulanan işlem ve etanol işlemi sonucunda ortaya çıkan spesifik etkileşimlere rağmen, para-aramid liflerinin genel yapısı ve nano kaplamaların belirginliğini koruduğu, nano parçacıkların p-aramid filament yüzeylerine fiziksel bir etkileşim sonucu tutundukları sonucuna varılmıştır. Zaten, kumaştan iplik çekme sonuçları (pull-out) da bu sonuçları teyid etmektedir.

Öte yandan, karbon nanotüp büyütme (CVD), plazma uygulanmış (PECVD) ve kimyasal kaplaması uzaklaştırılmış soft para-aramid kumaşların FTIR spektrum verileri incelendiğinde, 3290 cm^{-1} 'deki pik, amid (N-H) gruplarının titreşiminden kaynaklanmaktadır. Ancak, 1635 cm^{-1} 'deki pik, para-aramid liflerinin amid grubuna ait C=O gerilme titreşimini temsil etmekte olup (amid I) plazma ve CVD etkileşimi sonucu bu piklerde düşük değerlerde bir etkileşim tespit edilmiştir (Şekil 3.10). Ayrıca, 1505 cm^{-1} 'deki pik, para-aramid lifinin amid grubunun N-H bükülme titreşimi ile C-N gerilme titreşimini temsil etmekte olup (amid II) plazma ve CVD etkileşimi sonucu bu piklerde bariz bir etkileşim tespit edilmiştir (Şekil 3.10). Yine, 1391 cm^{-1} 'deki pik, p-aramid liflerinin aromatik amin yapısına ait C-N gerilme titreşimini temsil etmekte olup plazma ve CVD etkileşimi sonucu bu pik şiddetinde zayıflama görülmüştür (Şekil 3.10). Öte yandan, 1295 cm^{-1} 'deki pik, p-aramid liflerinde aromatik halkalar içinde C-N gerilme ve C-H bükülme titreşimlerini temsil etmekle birlikte plazma, CVD ve kimyasal uzaklaştırma etkileşimi sonucu bu pik şiddetlerinde düşük değerlerde bir farklılık görülmüştür (Şekil 3.10). Ek olarak, 1204 cm^{-1} 'deki pik, p-aramid lifinde eter (C-O) veya amin (C-N) bağlarının gerilme titreşimleriyle ilişkili olup pik şiddetinde kayda değer bir değişim gözlenmemiştir. 1086 cm^{-1} 'deki pik, para-aramid lifinde C-O bağlarına ait

gerilme titreşimleri bu bölgede bütün yapılarda gözlenmiştir. 1011 cm^{-1} 'deki pik, aromatik yapıdaki C-H salınım titreşimlerini temsil edip işlem görmüş filamentlerde pik şiddetinde azalmaya neden olmuştur (Şekil 3.10). Düşük şiddetteki piklerde ise 862 cm^{-1} 'deki pik, aromatik halkalardaki C-H düzlem dışı bükülme titreşimlerini temsil eder ve pik şiddetinde plazma işlemi sonucu hafif bir artış tespit edilmiştir. 821 cm^{-1} 'deki pik, aromatik halkalardaki C-H bükülme titreşimlerini içermekte olup CNTs büyütme işlemi sonrası bu pik de belirgin bir yoğunluk artışı gerçekleşmiştir. 655 cm^{-1} 'deki pik, aromatik halkalardaki C-H düzlem dışı bükülme ve C-C bükülme titreşimlerini içermekte olup özellikle plazma işlemi pikin şiddetinin bariz bir şekilde değişimine yol açmıştır (Şekil 3.10). Son olarak, 521 cm^{-1} 'deki pik, p-aramid lifindeki amid bağının (C-N-C) bükülme titreşimi gibi yorumlanmakla birlikte, CNTs'lerin düşük frekanslı ek titreşim modları da bu bölgede görülmüştür.

Bu sonuçlardan, CVD ile CNTs büyütme sonrası bazı piklerin yoğunluğunda artış gözlemlenerek, özellikle aromatik C=C, C-H bükülme ve CNT titreşim modları ile ilişkili pikler etkilenmiş olup, CNTs lerin filament yüzeyi ile kimyasal bağlar yaptığı öne sürülmüştür ki pull-out testleri ile elde edilen veriler bunu teyid etmekle birlikte iplik çekme verileri kontrol verileri ile kıyaslandığında muhtemelen sıcaklık etkisi ile düşük çıkmıştır. Plazma işlemi sonrası amid ve C-N bağlarında değişiklikler görülerek, bu da 1505 cm^{-1} , 1391 cm^{-1} ve 1295 cm^{-1} piklerinde etkileşimlere yol açmıştır. Plazmanın pull-out verilerinde etkisi sınırlı olmakla birlikte, çekme verileri kontrol verileri ile benzerlik göstermiştir.

4.1.3.1.3. RAMAN sonuçları

Nano kaplama soft para-aramid kumaşların Raman sonuçları kıyaslamalı olarak tartışılmıştır. Nano bor karbür (nh-B₄C) kaplı p-aramid kumaşın Raman spektrumunda, nano h-B₄C kaplı p-aramid kumaşın Raman spektrumunda (Şekil 3.4a-c), 788 cm^{-1} pikinin C-H düzlem dışı bükülme titreşimine karşılık geldiği gözlenmiştir [264]. Bu pik, muhtemelen para-aramid lifleri ile ilişkilidir. Pik şiddeti, filament ile kaplama arasındaki dağılım ve etkileşimi yansıtmaktadır. 1187 cm^{-1} pikinin C-H düzlem içi bükülme titreşimine karşılık geldiği belirlenmiştir [265]. Bu pik, aromatik halkalardaki C-H düzlem içi bükülme titreşimleri ile ilişkilidir ve şiddet değişimleri, iki bileşen arasındaki

etkileşimleri göstermektedir. 1278 cm^{-1} ve 1329 cm^{-1} Raman pikleri, amidler grubunda C-N gerilme titreşimlerine karşılık gelmektedir [265]. Bu pikler, para-aramid liflerindeki C-N gerilme titreşimlerini temsil etmektedir. 1413 cm^{-1} ve 1519 cm^{-1} pikleri, para-aramid liflerindeki aromatik halkalarda C=C gerilme titreşimlerine karşılık gelmektedir [265]. Pik şiddeti, B₄C kaplamadaki grafitik karbonun varlığı hakkında bilgi sağlamaktadır. 1612 cm^{-1} ve 1648 cm^{-1} pikleri sırasıyla aromatik halkada C=C gerilme titreşimini [265] ve amid gruplarında C=O gerilme titreşimini [265,266] temsil etmektedir. Pik şiddeti, kaplamanın kalitesi ve dağılımı hakkında önemli bilgiler sunmaktadır. Sonuç olarak, nano h-B₄C kaplamanın, p-aramid filamentlerin TOW (iplik grubu) içerisindeki dolanımını (entanglement) önemli ölçüde etkilediği belirlenmiştir (Şekil 3.4a). Belirli piklerde gerçekleştirilen Raman haritalaması, 1057 cm^{-1} pikinde B-C bağının gerilme titreşimine karşılık gelmektedir. Bu pik, B₄C kaplamanın para-aramid liflerini ne derece eşit şekilde kapladığını ve kaplama ile lifler arasındaki bağ kalitesini değerlendirmek açısından önemlidir. 1341 cm^{-1} pikinin haritalanması, B₄C kaplamanın yapısal bütünlüğündeki değişkenlik gösteren bölgelerin belirlenmesine yardımcı olabilir. 1570 cm^{-1} pikinin ise grafitik karbon ile ilişkili olduğu belirlenmiştir. Bu pikin haritalanması, B₄C kaplamadaki grafitik karbonun dağılımı hakkında önemli bilgiler sunarak kaplama ile lifler arasındaki etkileşimin anlaşılmasına katkı sağlar. Haritalardaki homojen yoğunluk, kaplamanın düzgün dağıldığını ve nano h-B₄C kaplamanın para-aramid lifleriyle etkileşime girerek aromatik yapı veya grafitik karbon içeriği üzerindeki etkilerini gösterdiğini ifade etmektedir (Şekil 3.4b-c).

MWCNT'ler ile kaplanmış p-aramid kumaşın Raman spektrumu (Şekil 3.4d-f) incelendiğinde, 788 cm^{-1} , 1107 cm^{-1} ve 1187 cm^{-1} pikleri sırasıyla C-H bağlarının düzlem dışı bükülmesi [264], C-H düzlem içi bükülmesi [266] ve para-aramid liflerinin aromatik halkalarındaki C-H bükülmesi ile ilişkilendirilebilir [265]. Bu piklerin şiddeti, MWCNT'lerin liflerle etkileşimini yansıtmaktadır. Ayrıca, 1278 cm^{-1} ve 1413 cm^{-1} pikleri sırasıyla amit gruplarındaki C-N gerilme titreşimlerine ve para-aramid liflerindeki aromatik halkaların C=C gerilme titreşimlerine karşılık gelmektedir [265]. Buna ek olarak, 1413 cm^{-1} ve 1519 cm^{-1} pikleri, aromatik halkalardaki C=C gerilme titreşimleri ve para-aramid liflerinin C-H bükülmesi ile ilişkilidir [265]. 1648 cm^{-1} ve 1612 cm^{-1} pikleri sırasıyla amit gruplarındaki C=O gerilme titreşimlerine ve liflerdeki C=C gerilme titreşimlerine karşılık gelmektedir [265,266]. Bununla birlikte, MWCNT'lerin D-bandı ve

G-bandı ile ilişkili pikler, nanotüp kaplamanın kalitesinin değerlendirilmesine yardımcı olabilir. Bu analiz, MWCNT kaplamasının kalitesini, dağılımını ve para-aramid lifleriyle etkileşimini anlamaya katkı sağlarken, nano-parçacık kaplı soft kumaş kompozitinin genel performansı hakkında da önemli bilgiler sunmaktadır (Şekil 3.4a). MWCNT'lerden elde edilen Raman haritalama spektrumunda, D bandı 1338 cm^{-1} 'de tespit edilirken, lif üzerindeki MWCNT'lerden elde edilen spektrumda D bandının 1331 cm^{-1} 'e kaydığı gözlemlenmiştir. Bu kayma, yumuşak para-aramid kumaş yapısı ile lif arasındaki etkileşime karşılık gelebilir (Şekil 3.4e-f). Öte yandan, G bandının 1567 cm^{-1} 'e kayması, MWCNT'ler ile para-aramid lifleri arasındaki fiziksel etkileşimle ilişkilendirilebilir [267]. Ayrıca, güçlü ve keskin bir 2D-bandı (G bandının ikinci harmonisi) 2669 cm^{-1} 'de gözlemlenmiştir, bu pik tipik olarak yüksek kaliteli ve az katmanlı MWCNT'lerin varlığını göstermektedir (Şekil 3.4e).

Şekil 3.4(g-i)'de gösterildiği üzere, GNP kaplı p-aramid kumaşın Raman spektrumunda, 788 cm^{-1} ve 1107 cm^{-1} pikleri sırasıyla C-H bağlarının düzlem dışı bükülme titreşimleri ve aromatik halkalarda C-H düzlem içi bükülme titreşimleri ile ilişkilidir. GNP'lerin varlığı bu piklerin yoğunluğunu değiştirebilir, bu da GNP'ler ile lif yüzeyi arasındaki etkileşimi göstermektedir. Bunun yanı sıra, 1187 cm^{-1} ve 1278 cm^{-1} pikleri sırasıyla C-H düzlem içi bükülme titreşimleri ve para-aramid liflerindeki amid gruplarına ait C-N gerilme titreşimleri ile ilişkilidir. GNPs kaplaması bu pikleri etkileyerek GNP'ler ile lifler arasındaki etkileşim derecesini ifade etmektedir. Ayrıca, 1329 cm^{-1} , 1413 cm^{-1} ve 1519 cm^{-1} pikleri sırasıyla C-N gerilme titreşimleri, aromatik halkalarda C=C gerilme titreşimleri ve yine aromatik halkalarda C=C gerilme titreşimleri ile ilişkilidir. Bu piklerin yoğunluğu, GNP kaplamasının kalitesi ve liflerle olan etkileşimi hakkında bilgi sağlamaktadır. GNP kaplı p-aramid kumaştan elde edilen Raman spektrumu, G bandının 1578 cm^{-1} 'e kaydığını göstermektedir. Bu kayma, hem para-aramid TOW içindeki fiziksel etkileşimlere hem de GNP'lerin filament yüzeylerine fiziksel bağlanmasına atfedilebilir. Bunun yanı sıra, 1648 cm^{-1} pikinin para-aramid liflerindeki amid gruplarına ait C=O gerilme titreşimlerine karşılık geldiği belirlenmiştir. GNP'lerin D-bandı ve G-bandı ile ilişkili pikler, grafen kaplamanın kalitesini ve para-aramid lifleriyle olan etkileşimini değerlendirmeye yardımcı olabilir (Şekil 3.4g). G-bandının (1578 cm^{-1}) haritalanması, GNP kaplamasının lif yüzeyindeki dağılımını ve düzgünlüğünü görselleştirmeye yardımcı olabilir. Yoğunluğun tutarlı olması, iyi bir kaplama kalitesini

gösterir ve bu da soft kumaşın iplik çekme (pull-out) özelliklerini geliştirmek için kritik öneme sahiptir. Bunun yanı sıra, 2713 cm^{-1} pikinin, D-bandının ikinci dereceden üst harmonik bileşeni olan 2D-bandı ile ilişkili olduğu belirlenmiştir. Bu pik, GNPs gibi grafen bazlı malzemelerde katman sayısının ve kalitesinin karakterizasyonu açısından büyük önem taşımaktadır. Bu pikin haritalanması, tabaka istiflenme düzeni (stacking order) derecesi ve GNPs kaplamasının para-aramid lifler üzerindeki genel kalitesi hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır (Şekil 3.4h-i).

Öte yandan, karbon nanotüp büyütme (CVD), plazma uygulanmış (PECVD) ve kimyasal kaplaması uzaklaştırılmış soft para-aramid kumaşların Raman spektrum verileri incelendiğinde (Şekil 3.11), 665 cm^{-1} pikinin para-aramid yapısındaki C-C bükülme titreşimleri ile ilişkili olabileceği değerlendirilmiştir ve yüzey modifikasyon işlemlerinden etkilenebilir. 788 cm^{-1} piki ise, aromatik halka yapılarındaki C-H düzlem dışı bükülme titreşimleriyle ilişkilidir. CNT büyütme ve plazma işlemi, bu pik yoğunluğunda bariz değişimlere neden olmaktadır. 1187 cm^{-1} Raman pikinde p-aramid filamentlerin aromatik halkalarında bulunan C-H gruplarının düzlem içi bükülme titreşimlerini temsil eder. CNT büyütme ve plazma işlemi, filament yüzeyindeki etkileşimleri yansıtmaya özelliği göstermektedir (Şekil 3.11). 1278 cm^{-1} piki, amid gruplarındaki C-N gerilme titreşimlerine karşılık gelmektedir. CNTs büyütmesi, plazma ve yüzey kimyasalının uzaklaştırılması gibi yüzey işlemleri, amid bağlarıyla etkileşime girerek pikin frekansında kaymalara veya yoğunluk değişimlerine sebep olabilir (Şekil 3.11). 1330 cm^{-1} piki, özellikle CNTs esaslı yapılarla ilişkili D-bandıdır. Genellikle, CNT büyütme işleminde ortaya çıkmaktadır. 1520 cm^{-1} piki, p-aramid liflerin aromatik halkalarındaki C=C gerilme titreşimleri ile ilişkilidir. CNTs büyütmesi ve plazma işlemi, bu pikin yoğunluğunu ve pozisyonunu etkilemektedir (Şekil 3.11). 1612 cm^{-1} piki muhtemelen CNTs büyütmesi ile ilişkilidir ki yüzey işleminde bu pikin yoğunluğu ve keskinliği artabilir, bu da yüzey işleminin kalitesini değerlendirmede kullanılabilir. Ayrıca, 1649 cm^{-1} Raman piki, amid gruplarındaki C=O gerilme titreşimlerine karşılık gelir. Plazma işlemi ve CNT büyütme, filament yüzeyinde amid grubu etkileşimlerine neden olarak bu pik yoğunluğunu ve pozisyonunu değiştirebilir (Şekil 3.11). Bu Raman verilerinin analizi ile CVD ile CNTs büyütme, plazma işlemi ve yüzey kimyasalının uzaklaştırılması gibi yüzey işlemlerinin para-aramid filamentlerin kimyasal yapısı üzerindeki etkilerini anlamak için kritik veriler sağladığı görülmüştür. Özellikle D-bandı

ve G-bandının ileriki çalışmalarda diğer ileri yüzey analiz teknikleri ile (örneğin XPS gibi) birlikte daha detaylı analiz edilerek para-aramid filament yüzeyinde CNTs büyütmesinin kalitesi, yüzeyle olan etkileşimi ve karbon yapılarının düzenlilik derecesi değerlendirilecektir.

4.1.3.1.4. XRD sonuçları

Nano kaplama soft para-aramid kumaşların XRD sonuçları kıyaslamalı olarak tartışılmıştır. Nano bor karbür (nh-B₄C) kaplı p-aramid kumaşın XRD spektrumunda (Şekil 3.5a), hem liflerin kristal yapısına hem de B₄C kaplamasına karşılık gelen pikleri içermektedir. 20,137°, 22,552° ve 28,881°'de gözlemlenen kırınım pikleri, sırasıyla 80337, 88590 ve 13988 yoğunluk değerleri ile kontrol p-aramid yapısına (KPO) atfedilmektedir. Buna karşılık, 20,339°, 22,684° ve 28,855°'de belirlenen pikler, 62759, 63997 ve 19216 gibi nispeten daha düşük yoğunluklara sahip olup, p-aramid lif yüzeyindeki B₄C kaplamasıyla ilişkili yansımaları (BPO) göstermektedir. Ayrıca, bu piklerin konumları ve yoğunlukları, lif alt tabakası ile B₄C kaplaması arasındaki etkileşim mekanizmaları hakkında kritik bilgiler vermektedir.

Şekil 3.5b'den görüldüğü üzere, çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNTs) kaplı p-aramid lif bazlı kumaşın (MPO) XRD spektrumu, hem liflerin kristal yapısına hem de MWCNT kaplamasına karşılık gelen pikleri içermektedir. 20,242°, 22,710° ve 28,750°'de gözlemlenen kırınım pikleri, sırasıyla 53909, 55908 ve 17313 yoğunluk değerleri ile p-aramid lif yüzeyindeki MWCNTs kaplamasıyla ilişkili yansımalarla işaret etmektedir (MPO). Ayrıca, bu pikler, MWCNTs kaplamasının kalitesi ile nanokaplı soft kumaş yapısındaki iki malzeme arasındaki etkileşim hakkında belirleyici bilgiler içermektedir.

Şekil 3.5(c), grafen nanoplakala (GNPs) kaplı p-aramid lif bazlı kumaşın (GPO) XRD spektrumunu göstermektedir ve bu spektrum, hem liflerin kristal yapısına hem de GNP kaplama tabakasına karşılık gelen pikleri içermektedir. 20,294°, 22,920° ve 28,697°'de gözlemlenen kırınım pikleri, sırasıyla 57864, 52836 ve 19381 yoğunluk değerleriyle, p-aramid lif yüzeyindeki GNPs kaplamasına bağlı yansımaları temsil etmektedir (GPO). Ek olarak, bu piklerin konumu ve yoğunluğu, kaplamanın kalitesi ile lifler ve GNPs tabakası arasındaki etkileşim mekanizmalarına dair açıklayıcı bilgiler sağlamaktadır.

Öte yandan, karbon nanotüp büyütme (CVD), plazma uygulanmış (PECVD) ve kimyasal kaplaması uzaklaştırılmış soft para-aramid kumaşların XRD spektrum verileri incelendiğinde (Şekil 3.12), karbon nanotüpler (CNTs) büyütüldüğü p-aramid filament bazlı kumaşın (gCPO), hem filamentlerin kristal yapısına hem de CNTs büyütme karşılık gelen pikleri içermektedir. Bunlar, $20,294^\circ$, $22,316^\circ$ ve $28,697^\circ$ 'de gözlemlenen kırınım pikleri, sırasıyla 83074, 77504 ve 20970 yoğunluk değerleri ile p-aramid filament yüzeyindeki CNTs kaplamasıyla ilişkili yansımalarla işaret etmektedir. Ayrıca, bu pikler, CNT büyümesinin kalitesi ile soft kumaş yapısındaki iki malzeme arasındaki etkileşim hakkında belirleyici bilgiler içermektedir.

Plazma işlemleri p-aramid filamentli kumaşın (PPO) XRD spektrumu (Şekil 3.12), hem filamentlerin kristal yapısına hem de plazma etkilerine karşılık gelen pikleri içermektedir. Bunlar, $20,320^\circ$, $22,684^\circ$ ve $28,671^\circ$ 'de gözlemlenen kırınım pikleri, sırasıyla 71775, 72328 ve 19645 yoğunluk değerleri ile p-aramid filament yüzeyindeki etkileşimlere bağlı yansımaları temsil etmektedir. Ek olarak, bu piklerin konumu ve yoğunluğu, plazma işleminin etkinlik derecesi ile filamentler arasındaki etkileşim mekanizmalarına dair açıklayıcı bilgiler sağlamaktadır.

Kimyasal uzaklaştırılmış p-aramid filamentli kumaşın (RPO) XRD spektrumu (Şekil 3.12), hem filamentlerin kristal yapısına hem de yüzey kimyasal etkilerine karşılık gelen pikleri içermektedir. Bunlar, $20,215^\circ$, $22,526^\circ$ ve $28,540^\circ$ 'de gözlemlenen kırınım pikleri, sırasıyla 770424, 73827 ve 14063 yoğunluk değerleri ile p-aramid filament yüzeyindeki etkileşimlere bağlı yansımaları temsil etmektedir. Ek olarak, bu piklerin konumu ve yoğunluğu, kimyasal uzaklaştırma işleminin etkinlik derecesi ile filamentler arasındaki etkileşim mekanizmalarına dair açıklayıcı bilgiler sağlamaktadır.

Sonuç olarak karbon nanotüp büyütme (CVD), plazma uygulanmış (PECVD) ve kimyasal kaplaması uzaklaştırılmış soft para-aramid kumaşların bu işlemlerden etkilendiği ve özellikle pull-out verilerini, kontrol verilerine kıyasla iyileştirdiği ancak çekme verilerinde önemli oranda düşmenin gCPO örneklerinde görüldüğü anlaşılmıştır. İleriki çalışmalarda CNTs ya da benzeri nano büyütme (örneğin çinko nano çubuk gibi) atmosfer koşullarında gerçekleştirilmesi yönünde çalışılacaktır.

4.1.3.1.5. TGA/DTA sonuçları

Nano kaplama soft para-aramid kumaşların TGA/DTA sonuçları kıyaslamalı olarak tartışılmıştır. Burada, p-aramid lifli kumaş formunda yüksek sıcaklık direnci ve üstün çekme dayanımının sinerjik bir birleşimini sergiler, bu durum kısmen yüksek derecede kristalize moleküler yapısından kaynaklanmaktadır [268,269]. Ayrıca, nh-B₄C, bor ve karbon atomları arasındaki sağlam kovalent bağlar ve yüksek kristalize yapısı sayesinde dikkate değer termal stabilite göstermektedir [13].

Nano bor karbür (nh-B₄C) kaplı p-aramid lifinin TG/DTG profili, Şekil 3.6(a-c)' de gösterildiği gibi, 26°C ile 300°C arasında yaklaşık %1.5'lik ilk bir ağırlık kaybı gözlenmiştir, bu durum büyük olasılıkla p-aramid lifinin yüzey işlemesi ve artık çözücünün buharlaşmasından kaynaklanmaktadır. P-aramid lifinin TGA (%) eğrisinde 560°C ile 600°C arasında %18 ile %54 arasında önemli bir malzeme bozulması tespit edilmiştir. Özellikle, 576°C'de nh-B₄C kaplı p-aramid lifi %40 ağırlık kaybı yaşarken, sırasıyla 554°C ve 576°C'de kontrol p-aramid lifi ve nh-B₄C'de %40 ağırlık kaybı ve %1.12 ağırlık kaybı gözlenmiştir (Şekil 3.6b-c). Sonuç olarak, n-B₄C'nin entegrasyonu, yüksek sıcaklıklarda termal stabiliteyi artırmıştır. 600°C'de, nh-B₄C kaplı p-aramid soft kumaş ve sadece nh-B₄C, sırasıyla orijinal kütlelerinin %46'sını ve %98,59'unu korurken, sadece p-aramid lifi %13,66'lık bir kalıntı kütlesi göstermektedir. Birincil bozunma aşamasındaki belirgin kütle kaybı, nh-B₄C kaplı lif yapısının kritik bir eşiğe kadar dikkate değer bir termal direnç gösterdiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, nh-B₄C kaplı ve kontrol p-aramid lifler için bozunma başlangıç sıcaklıkları sırasıyla 556°C ve 526°C olarak kaydedilmiş olup, %15'lik bir kütle kaybı ile uçucu bileşenlerin başlangıç salınımını göstermektedir. Maksimum türevsel kütle azalmasıyla belirlenen en yüksek kütle kaybı oranı, türevsel termogravimetri (DTG) eğrisinde 574°C'de meydana gelmiş ve bozunma hızının en yüksek seviyeye ulaştığı sıcaklığı işaret etmiştir. MWCNTs ve GNPs kaplı p-aramid soft yapılarına ait TG/DTG analiz sonuçları, nh-B₄C kaplı yapıya benzer eğilimler sergilemekle birlikte ayrı bir araştırma konusu olarak göz önüne alınarak burada tartışılmamıştır.

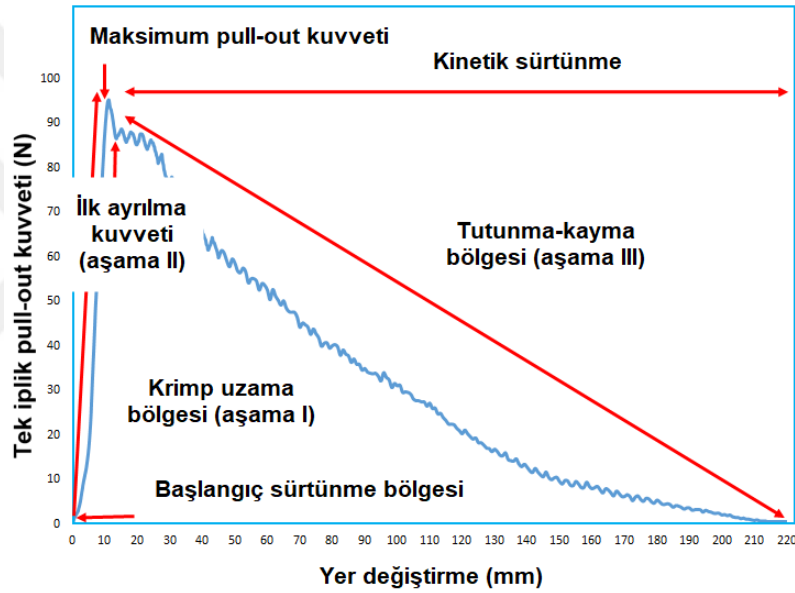
Öte yandan, karbon nanotüp büyütme (CVD), plazma uygulanmış (PECVD) ve kimyasal kaplaması uzaklaştırılmış soft para-aramid kumaşların TGA/DTA verileri Şekil 3.13(a-c)'de göz önüne alınarak incelenmiştir.

CNTs büyütmeli p-aramid filamentinin TG/DTG profili, Şekil 3.13a' da gösterildiği gibi, büyütmeye sıcaklığı 450°C'de p-aramid lifi %1 ağırlık kaybı yaşarken, sırasıyla 554°C ve 576°C'de p-aramid lifi %13 ağırlık kaybı ve %40 ağırlık kaybı gözlenmiştir. Filament yüzeyinde kademeli sıcaklık artışı ile (10 °/dak.) CNTs büyütmeye, nanokaplı malzemelere göre daha düşük değerlerde malzeme kaybı ile sonuçlanmıştır. 600°C'de ise orijinal kütlesinin %49,59'sını korumuştur. Ayrıca, CNTs büyütmeli p-aramid lifler için bozunma başlangıç sıcaklığı 556°C olarak kaydedilmiş olup, %15'lik bir kütle kaybı ile uçucu bileşenlerin başlangıç salınımını göstermektedir. Maksimum türevsel kütle azalmasıyla belirlenen en yüksek kütle kaybı oranı, türevsel termogravimetri (DTG) eğrisinde 574°C'de meydana gelmiş ve bozunma hızının en yüksek seviyeye ulaştığı sıcaklığı işaret etmiştir. Öte yandan, CNTs büyütmeli yapının pull-out performansının iyileştiği (Şekil 4.5a-c) ancak çekme performansının kontrol'a göre düşük değerlerde elde edildiği tespit edilmiştir (Şekil 4.5d). Plazma işlemli p-aramid filamentinin TG/DTG profili, Şekil 3.13b' da gösterildiği gibi, işlem sıcaklığı 80°C'de p-aramid lifi %1 in altında ağırlık kaybı yaşanmıştır. Ancak, pull-out performansının CNTs büyütmeliye kıyasla düşük olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.5a-c). Kimyasalı uzaklaştırılmış p-aramid filamentinin TG/DTG profili, Şekil 3.13c' de görüleceği üzere neredeyse kontrol p-aramid filamentle (Şekil 3.6b) aynı sonuçlar elde edilmiştir. Bu kendisini pull-out verilerinde de göstermiştir.

4.1.3.2. Nano kaplama, CVD ve PECVD işlemli soft para-aramid kumaş yapıların pull-out kuvvet(N)-yer değiştirme(mm) sonuçları

Şekil 4.3' de nano kaplamalı soft p-aramid kumaş yapısının karakteristik pull-out(N)-yer değiştirme(mm) grafiği verilmiştir. Şekil 4.3'ten görüleceği üzere, nano kaplamalı kumaşın tek iplik çekme grafiği kontrol örneğiyle büyük ölçüde örtüşmesine rağmen, maksimum çekme kuvvetine yaklaşırken belirgin ve neredeyse doğrusal bir artış sergilemektedir. Bu artış, krimp uzama bölgesi olarak tanımlanan başlangıç aşamasında gözlenmektedir. Bu aşama, kumaş yapısının oluşumu için kritik olan çözgü-atkı kesişmelerine bağlı birikmiş iplik uzunluğundan kaynaklanmakta olup, aynı zamanda başlangıç sürtünme bölgesini de kapsamaktadır (aşama I). İkinci bölge, ilk ayrılma kuvveti (aşama II) bölgesi olarak adlandırılmakta olup, başlangıç ayrılma kuvvetine kadar uzanır ve maksimum çekme kuvvetini takiben belirgin bir düşüş ile karakterize edilir. Bu aşamada çözgü, başlangıçta ilk olarak atkıdan ayrılmaktadır. Üçüncü bölge ise, çözgü

ipliğinin her bir atkı ipliğinden kademeli olarak ayrıldığı ve çekme kuvvetinin döngüsel olarak azalıp arttığı tutunma-kayma (translations) bölgesini içermektedir. Bu bölgenin başlangıcında nano parçacıkların birikimli etkisi düzensiz ve kaba tutunma-kayma aralıklarına yol açmaktadır. Bu olgunun, sürtünme etkileşimleri nedeniyle enerji sönmlemeyi artırıcı bir katkı sağladığı düşünülmektedir. Ayrıca, başlangıç ayrılma kuvvetini takip eden ve ipliğin tamamen kumaş yapısından ayrıldığı aşama, kinetik sürtünme bölgesi olarak tanımlanmıştır [45].



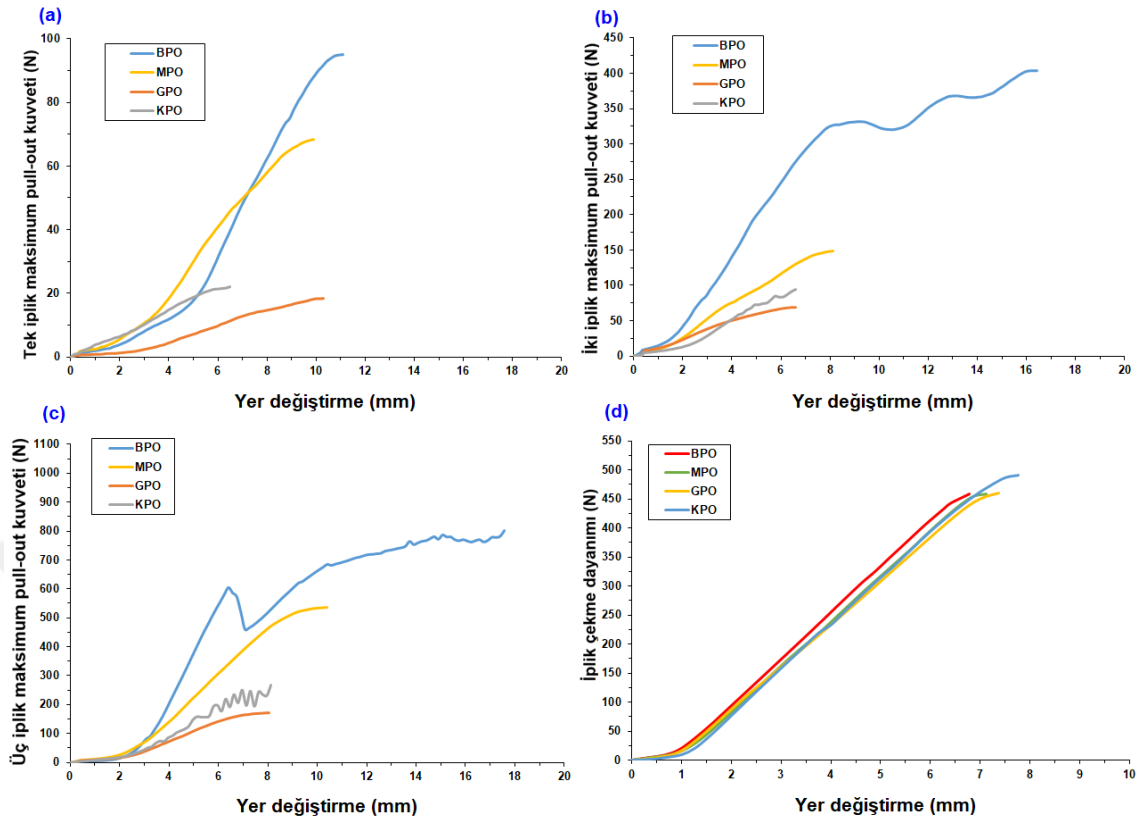
Şekil 4.3. Nano kaplamalı soft p-aramid kumaş yapısının karakteristik pull-out(N)-yer değiştirme(mm) grafiği.

İlk tek iplik çekme testleri, ardışık ikinci ve üçüncü ipliklere kıyasla olağanüstü yüksek bir çekme kuvveti ortaya koymuştur (Şekil 3.7a1-a4). Takip eden çekme testleri benzer sonuçlar vermiştir. Özellikle nano h-B₄C yapısı (Şekil 3.7a1), diğer kaplamalı ve kontrol yapılarıyla (Şekil 3.7a2-a4) karşılaştırıldığında, özellikle krimp uzama bölgesinde önemli ölçüde yüksek çekme kuvveti değerleri sergilemiştir. Ayrıca, n-B₄C kaplamalı yapının tutunma-kayma bölgesi, diğer yapılarla kıyasla daha düzensiz ve geniş aralıklı azalan kuvvet değerleri göstermiştir. Buna ek olarak, nh-B₄C ve MWCNTs kaplamalı yapılarda, ardışık ikinci ve üçüncü iplikler için gözlemlenen çekme kuvvetleri, GNPs kaplamalı ve kontrol yapılarına göre belirgin şekilde daha yüksek bulunmuştur. Bu duruma katkıda

bulunan temel faktörler arasında, nano parçacıkların neden olduğu yüzey pürüzlülüğü yer almakta olup, bu etki kesişme bölgesi içerisinde filamentler arası sürtünmeyi artırmaktadır. Bunun yanı sıra, nano parçacıklar arasındaki birikimli sürtünme etkileşimleri de önemli bir rol oynamaktadır. Bu mekanizmanın, ileri düzey soft balistik uygulamalar için kritik bir parametre olan enerji sönümlene seviyelerini artırmada belirleyici bir rol oynaması beklenmektedir.

İlk çoklu (2-uçlu ve 3-uçlu) iplik çekme testleri, ardışık ikinci ve üçüncü çoklu ipliklere kıyasla dikkate değer derecede yüksek çekme kuvvetleri sergilemiştir (Şekil 3.7b1-b4, c1-c4). Özellikle nano h-B₄C yapısı (Şekil 3.7b1, c1), diğer kaplamalı ve kaplamasız kontrol yapılarını (Şekil 3.7b2-b4, c2-c4) aşarak, krimp uzama bölgesinde olağanüstü yüksek değerler göstermiştir. Ayrıca, nh-B₄C kaplamalı yapının tutunma-kayma bölgesi, diğer yapılara kıyasla daha düzensiz ve geniş aralıklı azalan kuvvet değerleri ortaya koymuştur. Bunun yanı sıra, nh-B₄C kaplamalı yapılarda ardışık ikinci ve üçüncü çoklu iplikler için gözlemlenen çekme kuvvetleri, MWCNTs, GNP's kaplamalı ve kontrol yapılarında kaydedilen değerlere kıyasla belirgin şekilde daha yüksek bulunmuştur. Çoklu iplik testlerinde elde edilen çekme kuvvetleri, tek iplik testlerine kıyasla belirgin bir doğrusal olmayan tepki sergilemiştir. Bu davranış, özellikle soft balistik uygulamalar bağlamında mermi-yapı etkileşimleri açısından önemli bir olgudur. Örneğin, bir merminin 12-uçlu gibi çoklu çözgü-atkı iplikleriyle etkileşime girmesi, bu etkinin belirgin bir örneğini teşkil etmektedir [91].

Nano kaplama (nh-B₄C, MWCNTs, GNP's) p-aramid soft yapıların (KPO, BPO, MPO ve GPO) tekli ve çoklu pull-out(N)-yer değiştirme(mm) maksimum değerlerini içeren karşılaştırmalı grafikler Şekil 4.4(a-d) de verilmiştir.



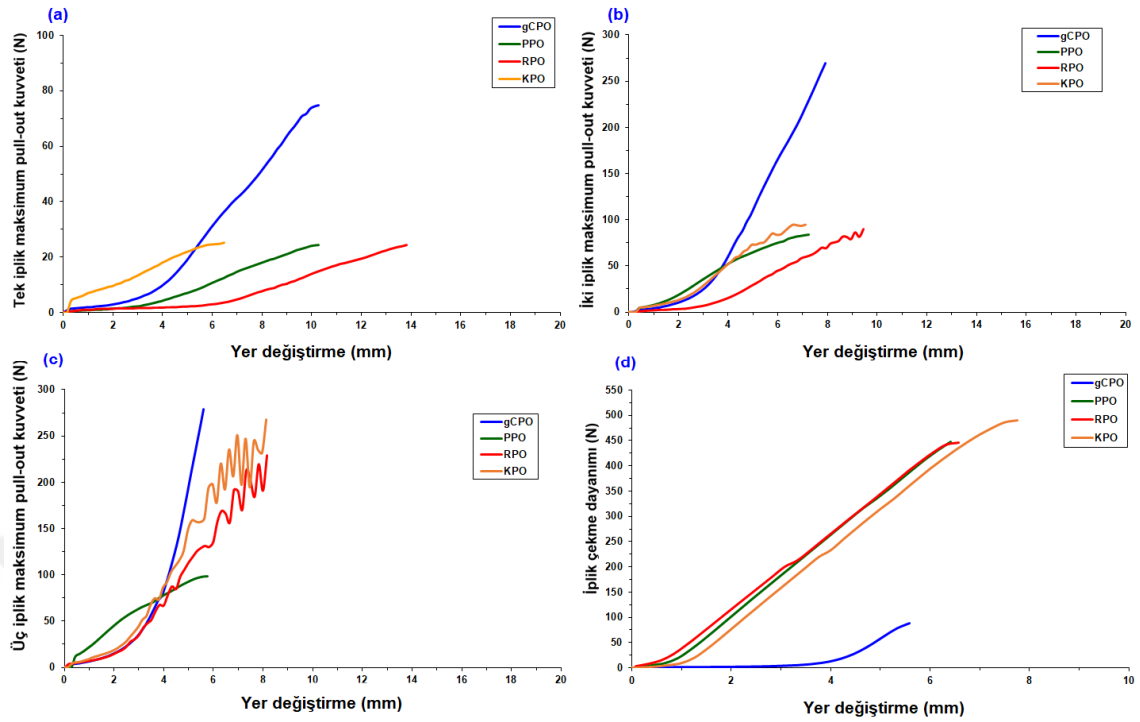
Şekil 4.4. Nano kaplama soft p-aramid kumaş yapılarında tekli ve çoklu iplik maksimum pull-out kuvvet-yerdeğiştirme grafikleri. (a) Tek iplik maksimum pull-out kuvvet-yer değiştirme, (b) İki iplik maksimum pull-out kuvvet-yer değiştirme, (c) Üç iplik maksimum pull-out kuvvet-yer değiştirme ve (d) Geleneksel iplik çekme dayanımı.

Tablo 3.2 ve Şekil 4.4(a-d)'de gösterilen tekli ve çoklu iplik çekme kuvveti verileri, BPO'nun tekli iplik çekme kuvvetinin MPO'ya kıyasla %38,86 oranında üstünlük sergilediğini ve GPO ile KPO yapılarına göre sırasıyla 5 kat ve 3,75 kat daha yüksek olduğunu göstermektedir. Buna karşılık, KPO'nun tekli iplik çekme kuvveti, GPO'ya kıyasla %38,23 oranında daha büyük olarak tespit edilmiştir (Şekil 4.4a). Ayrıca, BPO'nun iki iplikli çekme kuvveti, MPO, GPO ve KPO yapılarına kıyasla sırasıyla 2,73, 5,87 ve 4,25 kat daha yüksek bulunmuştur. Öte yandan, KPO'nun iki iplikli çekme kuvveti, GPO'ya kıyasla %38,16 oranında daha yüksek elde edilmiştir (Şekil 4.4b). Bunun yanı sıra, BPO'nun üç iplikli çekme kuvveti olağanüstü yüksek bulunmuş olup, MPO, GPO ve KPO yapılarına kıyasla sırasıyla %51,90, %465 ve %300 daha fazla olduğu belirlenmiştir. Dikkat çekici bir şekilde, KPO'nun üç iplikli çekme kuvveti, GPO'ya kıyasla %55,38 daha yüksek olarak ölçülmüştür (Şekil 4.4c).

Nano h-B₄C ve MWCNT'lerin yapıya dâhil edilmesi, muhtemelen çözgü ve atkı iplik demetleri arasına daha etkin bir şekilde nüfuz etmelerini kolaylaştırmış ve bunun sonucunda daha pürüzlü filament yüzeylerinin oluşumuna yol açmıştır [43]. Bu iyileştirilmiş yüzey topolojisinin, filamentler arası ve nano-parçacıklarla filament-nano arayüzleri arasındaki sürtünmeye dayalı etkileşimleri artırdığı hipotez edilmektedir. Bu doğrultuda, söz konusu nanomalzemeler, ilk ayrılma kuvveti (interlacement) aşamasından önce çekme kuvvetlerine karşı gösterdikleri direnç nedeniyle daha yüksek maksimum iplik çekme kuvvetleri sergilemiştir. Bu mekanizma, özellikle soft balistik uygulamalarda enerji sönmüleme kapasitesine katkı sağlaması bakımından kritik öneme sahiptir. Buna karşılık, GNPs'lerin yapıya ilavesi, soft kumaş yapısının maksimum çekme kuvvetini düşürücü etki göstermiştir ve bu durum, yağlayıcı (lubrikatif) bir etkiyle ilişkilendirilmektedir. Bu olgu, düzgün nanoplatelet yüzeyleri ile filament-nano arayüzlerinde gerçekleşebilecek potansiyel kayma etkileşimlerinden kaynaklandığı şeklinde yorumlanmıştır [66].

Diğer taraftan, KPO yapısına ait tekli para-aramid ipliklerin çekme mukavemeti, sırasıyla BPO, MPO ve GPO yapılarına kıyasla %7,15, %7,99 ve %6,73 oranlarında bir artış sergilemiştir. Ayrıca, MWCNTs ve GNPs ile kaplanmış para-aramid ipliklerin çekme eğrilerinin büyük ölçüde çakıştığı, B₄C ile kaplanmış ipliklerin ise Şekil 4.4d'de gösterildiği üzere hafif derecede daha rijit bir mekanik davranış sergilediği gözlenmiştir. Nano-kaplanmış ipliklerdeki çekme mukavemetinde meydana gelen sınırlı performans kaybı, yüksek sıcaklık ve basınç gibi zorlu işlem koşullarının yanı sıra, nanoparçacıkların iplikler arası boşluklara kısmi olarak nüfuz etmesi sonucunda filamentlerle belirli bir düzeyde dolaşıklık oluşması gibi birleşik etkilerle ilişkilendirilmiştir.

Öte yandan, Şekil 4.5(a-d)' de CVD, PECVD işlemleri ve kimyasal uzaklaştırılmış yapıların (gCPO, PPO, RPO) tekli ve çoklu pull-out(N)-yer değiştirme(mm) maksimum değerlerini içeren karşılaştırmalı grafikleri görülmektedir.



Şekil 4.5. Kimyasal buhar biriktirme(CVD) ve plazma işlemlili soft p-aramid kumaş yapılarında tekli ve çoklu iplik maksimum pull-out kuvvet-yerdeğiştirme grafikleri. (a) Tek iplik maksimum pull-out kuvvet-yer değiştirme, (b) İki iplik maksimum pull-out kuvvet-yer değiştirme, (c) Üç iplik maksimum pull-out kuvvet-yer değiştirme ve (d) Geleneksel iplik çekme dayanımı.

Tablo 3.4 ve Şekil 4.5(a-d)'de gösterilen tekli ve çoklu iplik çekme kuvveti verileri, gCPO'nun tekli iplik çekme kuvvetinin PPO'ya kıyasla %67,28 oranında üstünlük sergilediğini ve RPO ile KPO yapılarına göre sırasıyla %67,28 ve %66,19 daha yüksek olduğunu göstermektedir. Buna karşılık, KPO'nun tekli iplik çekme kuvveti, RPO'ya kıyasla %3,21 oranında daha büyük olarak tespit edilmiştir (Şekil 4.5a). Ayrıca, gCPO'nun iki iplikli çekme kuvveti, PPO, RPO ve KPO yapılarına kıyasla sırasıyla 3,22, 3,00 ve 2,84 kat daha yüksek bulunmuştur. Öte yandan, KPO'nun iki iplikli çekme kuvveti, RPO'ya kıyasla %5,38 oranında daha yüksek elde edilmiştir (Şekil 4.5b). Bunun yanı sıra, gCPO'nun üç iplikli çekme kuvveti olağanüstü yüksek bulunmuş olup, PPO, RPO ve KPO yapılarına kıyasla sırasıyla %282, %17,74 ve %3,81 daha fazla olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, KPO'nun üç iplikli çekme kuvveti, RPO'ya kıyasla %14,49 daha yüksek olarak ölçülmüştür (Şekil 4.5c).

P-aramid filament üzerinde CNTs büyütmesi, muhtemelen çözgü ve atkı filament demetleri üzerinde daha etkin bir şekilde konumlanmaları ve bunun sonucunda daha pürüzlü yada karbon nanotüp tüylü filament yüzeylerinin oluşumuna yol açmıştır [43].

Bu yüzey topolojisinin, CNTs ekili filament arayüzleri arasındaki sürtünmeye dayalı etkileşimleri artırdığı manifest edilmektedir. Bu doğrultuda, CNTs ekili filamentler, ilk iplik çıkma kuvveti (aşama II) safhasından önce çekme kuvvetlerine karşı gösterdikleri direnç nedeniyle daha yüksek maksimum iplik çekme kuvvetleri sergilemiştir. Bu mekanizma, özellikle soft balistik uygulamalarda enerji sönümleme kapasitesine katkı sağlaması bakımından kritik öneme sahip olabilir. Buna karşılık, yüzey plazma işlemi PPO'lerin, soft kumaş yapısının maksimum çekme kuvvetini düşürücü etki göstermiştir ve bu durum, mikro filament kırılmaları ile ilişkilendirilmektedir.

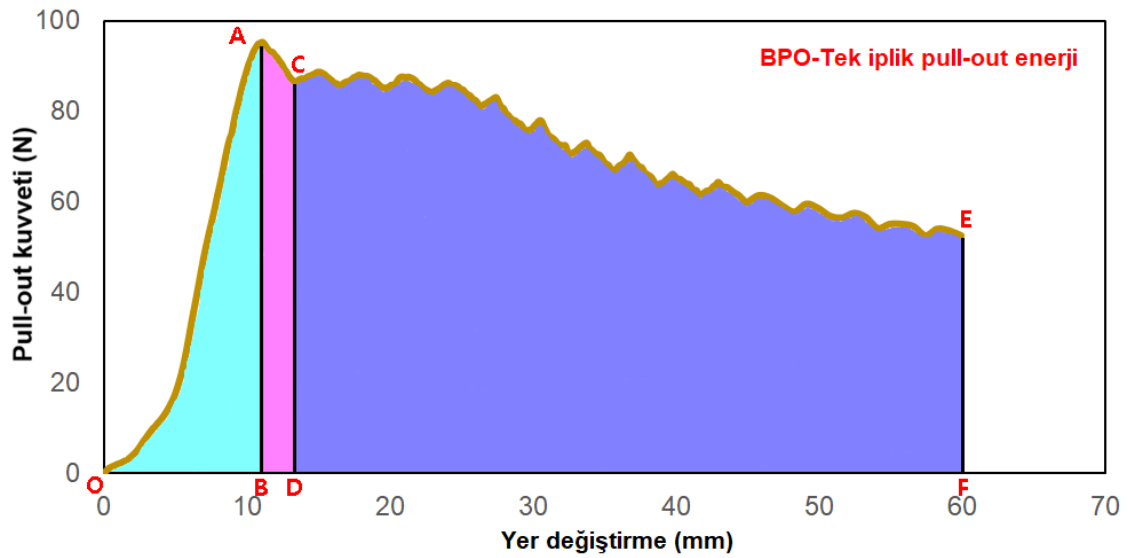
Diğer taraftan, KPO yapısına ait tekli para-aramid ipliklerin çekme mukavemeti (tensile strength), sırasıyla gCPO, PPO ve RPO yapılarına kıyasla %563 (beş katın üzerinde), %9,80 ve %10,34 oranlarında bir artış sergilemiştir. Ayrıca, KPO, PPO ve RPO p-aramid ipliklerin çekme eğrilerinin büyük ölçüde çakıştığı, gCPO ile kaplanmış ipliklerin ise Şekil 4.5d'de gösterildiği üzere düşük performanslı bir çekme dayanım davranışı gösterdiği tespit edilmiştir. gCPO'nun çekme mukavemetinde meydana gelen sıradışı performans kaybı, yüksek sıcaklık altında CNTs büyütmesi esnasında filamentin moleküler yapısındaki kimyasal bozunmaya bağlanmıştır. Bunun için para-aramid filament demetli soft kumaş yapısına tercihan düşük sıcaklıklarda işlem yapılması ve gerekiyorsa alternatif (örneğin soğuk nano lif büyütme) yöntemlerin geliştirilmesi gerekmektedir.

4.1.3.3. Nano kaplama, CVD ve PECVD işlemli soft para-aramid kumaş yapıların pull-out enerji sonuçları

Nano kaplama ve CVD-PECVD işlemli soft para-aramid kumaş yapıların kumaştan iplik çekme performansları literatürlerden de görüleceği üzere örneğin, Pöhler ve arkadaşları, mikrodalga indüklemeli yüzey modifikasyonu ile para-aramid liflerin üzerine nanoölçekli yapılar kazandırarak, epoksi içermeyen sistemlerde iplikler arası mekanik kilitlenmeyi belirgin biçimde artırmış; yapılan pull-out testlerinde işlenmemiş kumaşa göre çekme kuvvetinin yaklaşık %35 oranında yükseldiğini rapor etmişlerdir [270]. Zhang ve arkadaşları, epoksi içermeyen sistemlerde Kevlar kumaşların nano-SiO₂ partikülleri ile

yüzeysel olarak emprenye edilmesinin, lifler arası sürtünmeyi artırarak iplik çekme direncini yaklaşık %28 oranında yükselttiğini ve enerji yutma kapasitesinde de anlamlı bir artış sağladığını belirtmiştir [271]. Yapılan çalışmalardan da teyit edildiği üzere, dokuma kumaş yüzeyi, ara-yüzeylerine emprenye edilmiş nanomalzemeler ile filament ve iplikler arasındaki sürtünmeyi artırarak sonuçta pull-out enerji değerlerinin artmasına ve dolayısı ile bunların özellikle soft balistik uygulamalardaki enerji sönümleme performansını iyileştirmektedir.

Şekil 4.6 nano h-B₄C kaplı p-aramid kumaşın pull-out-yer değiştirme grafiğinden elde edilen temsili enerji sönümleme aşamalarını göstermektedir.



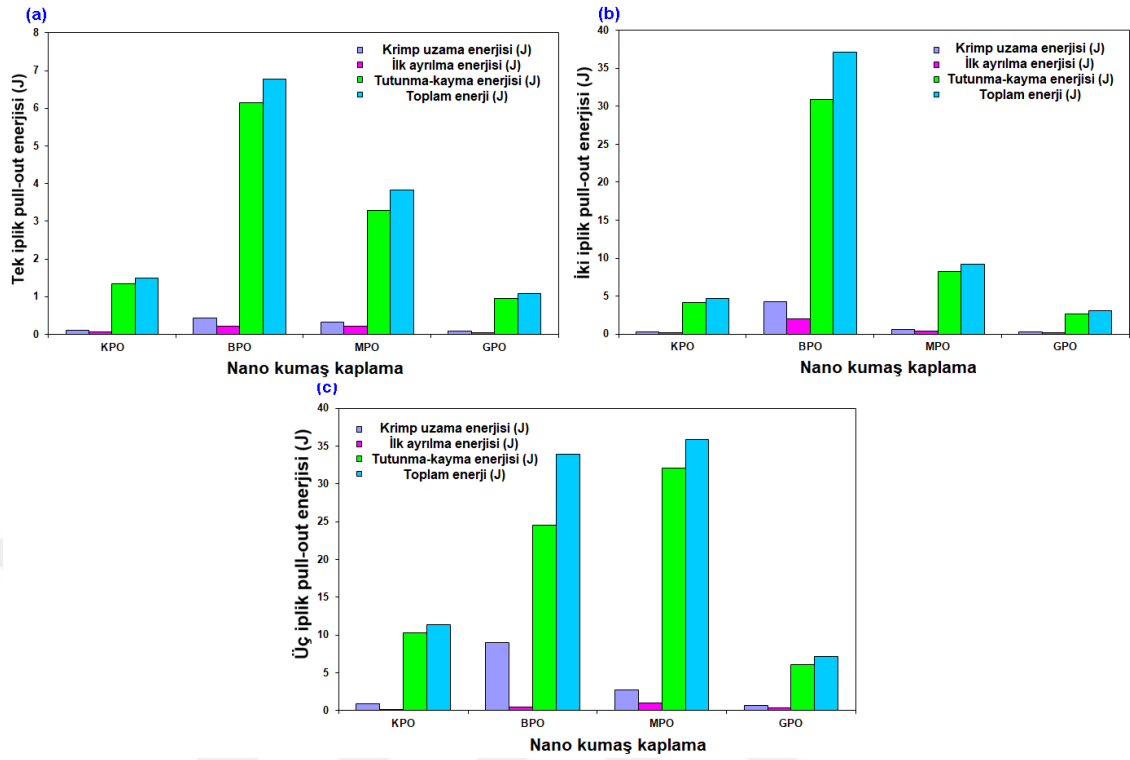
Şekil 4.6. Nano B₄C kaplı p-aramid kumaşın pull-out kuvveti(N)-yer değiştirme(mm) grafiğinden temsili enerji sönümleme bölgelerinin tanımı [238].

Şekil 4.6'da gösterildiği üzere, pull-out-yer değiştirme mekanizması üç farklı enerji bölgesine ayrılabilir: krimp uzama enerjisi (aşama I), ilk iplik çıkma kuvveti enerjisi (aşama II) ve tutunma-kayma enerjisi (aşama III). Aşama I, ipliğin kumaş yapısından çekilmesi sırasında gerekli enerjinin esas olarak krimpin uzaklaştırılması yoluyla sönümlendiği krimp düzleştirme bölgesi (OABO) ile ilişkilidir. Bu mekanizma, özellikle çözgü-atkı kesişim noktalarında lokalize basınç oluşturarak, kumaş yapısındaki iplik-iplik sürtünme esaslı önemli bir enerji yutma yolu olarak işlev görmektedir. Söz konusu basınç, aşağıda verilen ilişki (denklem 4.1) ile açıklanmakta olup, çözgü ve atkı iplikleri üzerinde artan büzülme etkileri yaratmaktadır [105,272].

$$Tw = Tf \sqrt{\frac{cf}{cw}} \quad (4.1)$$

Burada Tw çözgü gerginliğini (N), Tf atkı iplik gerginliğini (N), cw çözgü krimp oranını (%) ve cf de atkı krimp oranını (%) göstermektedir.

Aşama II (ACDB Bölgesi), maksimum pull-out kuvvetinin ulaşılmasının hemen ardından meydana gelmektedir. İlk iplik çıkma kuvvet enerjisi olarak tanımlanan bu evre, çözgü/atkı bağlantılarının ilk ayrışmasıyla karakterize edilmektedir. Bu aşamada ani enerji yutumu ile daha kompleks birikimli geri çekilme etkileri (accumulative retraction force effects) gözlenmiştir [273]. Aşama III (CEFD Bölgesi), çözgü ve atkı ipliklerinin her bir kesişim noktasında ilerleyici biçimde ayrışmasını kapsamaktadır. Bu fazda, iplik yüzeyleri esas olarak sürtünme yoluyla etkileşime girmektedir. Bu süreç devam ederken, ilişkili kuvvetler kademeli olarak azalarak tutunma-kayma enerji bölgesini tanımlamaktadır. Kumaş yapısındaki komşu ipliklerin birikimli etkileri, her bir kesişim noktasında gerçekleşen olguların karmaşıklığını daha da artırmaktadır. Farklı nanokaplı p-aramid kumaş yapılarının tekli ve çoklu pull-out enerjileri-krimp uzama enerjisi, ilk iplik çıkma kuvveti enerjisi ve tutunma-kayma enerjisi dahil olmak üzere-PYTHON programlama dili referans sürüm 3.1.2.4 (The Python Software Foundation, Amsterdam, NL) kullanılarak hesaplanmış olup, Şekil 4.7(a-c)'de görülmektedir.

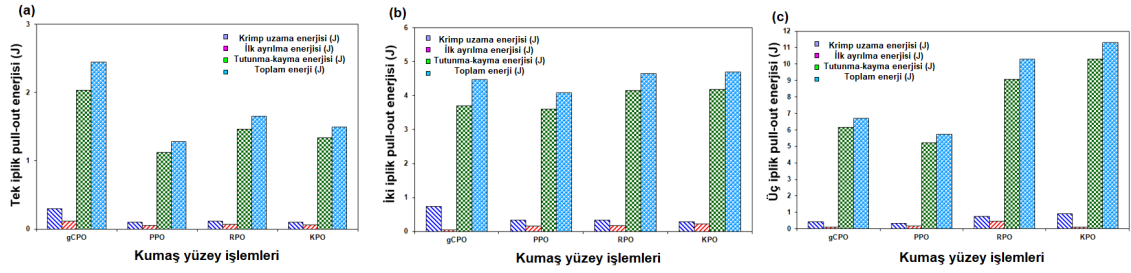


Şekil 4.7. Nano kaplama p-aramid kumaş yapısında tekli ve çoklu pull-out enerji sönümlleme sonuçları. (a) Tekli iplik pull-out enerji sönümlleme, (b) İki iplik pull-out enerji sönümlleme ve (c) Üç iplik pull-out enerji sönümlleme [238].

Şekil 4.7(a-c)'de gösterildiği üzere, tekli iplik pull-out testlerinde toplam enerji yutumuna krimp uzama enerjisi, ilk iplik çıkma kuvveti enerjisi ve tutunma-kayma enerjisinin katkıları şu şekilde belirlenmiştir: KPO örneği için bu katkılar sırasıyla %6,61, %3,94 ve %89,40 olarak hesaplanmıştır. BPO durumunda ise söz konusu katkılar sırasıyla %6,26, %3,10 ve %90,64 olarak kaydedilmiştir. MPO yapısında bu oranlar %8,67, %5,47 ve %85,86 iken, GPO için sırasıyla %8,21, %3,36 ve %88,43 olarak tespit edilmiştir. Tüm nanokaplı soft kumaş yapılarına ait çiftli iplik çekip-çıkarma testleri bağlamında, toplam enerji yutumuna kıvrım enerjisinin katkısı %6,05 ile %11,57 arasında değişim göstermiştir. İlk iplik çıkma kuvvet enerjisi katkısı ise %4,42 ile %5,43 aralığında seyretmiştir. Tutunma-kayma enerjisinin katkısı baskın olup, %83,00 ile %89,16 arasında değişmiştir. Öte yandan, üçlü iplik çekip-çıkarma testlerinde, kıvrım enerjisinin toplam enerji yutumuna katkısı %7,59 ile %26,36 arasında değişirken, İlk iplik çıkma kuvvet enerjisi katkısı %0,97 ile %4,79 aralığında belirlenmiştir. Tutunma-kayma enerjisinin katkısının ise %72,34 ile %91,01 arasında değiştiği saptanmıştır.

Şekil 4.7’de sunulduğu üzere, BPO yapısının tekli iplik toplam pull-out enerjisi, MPO’ya kıyasla %76,37 oranında dikkate değer bir artış sergilemiş olup, bu değer GPO yapısından 6,32 kat ve KPO yapısından 4,52 kat daha yüksek olarak belirlenmiştir. Buna karşılık, GPO yapısının tekli iplik toplam pull-out enerjisinin, KPO yapısına göre %28,39 daha düşük olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, BPO yapısının çiftli iplik toplam pull-out enerjisi anlamlı düzeyde daha yüksek bulunmuş; bu değer MPO, GPO ve KPO yapılarına göre sırasıyla 4,02, 11,98 ve 7,92 kat fazladır. Öte yandan, GPO yapısının çiftli iplik toplam pull-out enerjisinin, KPO yapısına kıyasla %33,94 oranında daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Ek olarak, MPO yapısının üçlü iplik toplam pull-out enerjisi, GPO ve KPO yapılarına kıyasla sırasıyla 5,03 ve 3,17 kat daha yüksek olarak kaydedilmiş ve anlamlı bir artış sergilemiştir. Buna karşılık, GPO yapısının üçlü iplik toplam pull-out enerjisinin, KPO yapısına göre %37,09 oranında daha düşük olduğu gözlenmiştir. BPO yapısının üçlü iplik toplam pull-out enerjisi, testler sırasında meydana gelen erken iplik kopmaları nedeniyle analiz dışında bırakılmıştır; bu durum, oldukça yüksek dirençli sürtünme kuvvetlerinin oluşmasına atfedilmiştir. Bununla birlikte, BPO yapısının üçlü iplik toplam pull-out enerjisinin, hem GPO hem de KPO yapılarına göre birkaç kat daha yüksek seviyede kaldığı belirlenmiştir. Sonuç olarak, nanokaplı kumaş yapılarının tekli ve çoklu iplik çekip-çıkarma enerjileri içerisinde en yüksek enerji sönümleme bölgeleri, azalan sırayla; tutunma-kayma enerjisi (aşama III), krimp uzama enerjisi (aşama I) ve ilk iplik çıkma kuvvet enerjisi (aşama II) olarak tanımlanmıştır. nh-B₄C ve MWCNT katkılarının, bu enerji bölgelerinin tümünde enerji yutumu açısından iyileştirici etkiler gösterdiği saptanmıştır. Dikkate değer bir diğer gözlem ise, nano-takviyelendirme yoluyla krimp uzama enerjisi yutululumunun artırılmasıdır. Özellikle, ipliklerin kumaş yapısı içerisinde herhangi bir çözülme meydana gelmeksizin enerji yutma kapasitelerindeki artış, bu aşamada anlamlı bir gelişim olarak değerlendirilmektedir. Örneğin, nh-B₄C ile takviyelendirilmiş kumaşların krimp uzama enerjileri; kontrol kumaşına kıyasla, sırasıyla tekli, çiftli ve üçlü iplik konfigürasyonlarında 4,28, 15,14 ve 9,86 kat daha yüksek bulunmuştur. Bu bulgular, ilerideki soft balistik uygulamalar açısından potansiyel bir performans artışına işaret etmektedir.

CVD, PECVD ve kimyasal uzaklaştırılmış soft para-aramid kumaş yapıların tekli ve çoklu pull-out enerji sonuçları-kıvrım uzama enerjisi, ilk iplik çıkma kuvvet enerjisi ve tutunma-kayma enerjisi dahil olmak üzere-Şekil 4.8(a-c)’de sunulmaktadır.



Şekil 4.8. CVD ve PECVD p-aramid kumaş yapısında tekli ve çoklu pull-out enerji sönümlenme sonuçları. (a) Tekli iplik pull-out enerji sönümlenme, (b) İki iplik pull-out enerji sönümlenme ve (c) Üç iplik pull-out enerji sönümlenme.

Şekil 4.8(a-c)'de gösterildiği üzere, tekli iplik pull-out testlerinde toplam enerji yutumuna kıvrım uzama enerjisi, ilk iplik çıkma kuvveti enerjisi ve tutunma-kayma enerjisinin katkıları şu şekilde belirlenmiştir: KPO örneği için bu katkılar sırasıyla %6,67, %4,00 ve %89,33 olarak hesaplanmıştır. gCPO durumunda ise söz konusu katkılar sırasıyla %12,29, %4,91 ve %83,20 olarak kaydedilmiştir. PPO yapısında bu oranlar %7,81, %4,69 ve %87,50 iken, RPO için sırasıyla %7,27, %4,24 ve %88,48 olarak tespit edilmiştir. Tüm işlem görmüş soft kumaş yapılarına ait çiftli iplik çekip-çıkarma testleri bağlamında, toplam enerji yutumuna kıvrım enerjisinin katkısı %5,97 ile %16,52 arasında değişim göstermiştir. İlk iplik çıkma kuvvet enerjisi katkısı ise %1,11 ile %4,90 aralığında seyretmiştir. Tutunma-kayma enerjisinin katkısı baskın olup, %82,59 ile %89,33 arasında değişmiştir. Öte yandan, üçlü iplik pull-out testlerinde, kıvrım enerjisinin toplam enerji yutumuna katkısı %6,10 ile %8,04 arasında değişirken, İlk iplik çıkma kuvvet enerjisi katkısı %0,97 ile %4,66 aralığında belirlenmiştir. Tutunma-kayma enerjisinin katkısının ise %88,06 ile %92,09 arasında değiştiği saptanmıştır.

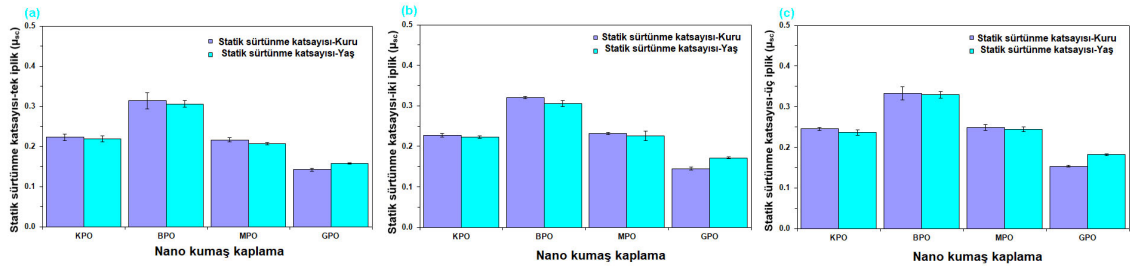
Şekil 4.8'de sunulduğu üzere, gCPO yapısının tekli iplik toplam pull-out enerjisi, PPO'ya kıyasla %47,54 oranında dikkate değer bir artış sergilemiş olup, bu değer RPO yapısından %32,38 ve KPO yapısından %38,37 daha yüksek olarak belirlenmiştir. Buna karşılık, RPO yapısının tekli iplik toplam pull-out enerjisinin, KPO yapısına göre %9,10 daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, gCPO yapısının çiftli iplik toplam pull-out enerjisi PPO ya karşı %8,70 daha yüksek ancak, RPO ve KPO yapılarına göre sırasıyla %4,02 ve %4,69 daha düşük bulunmuştur. Öte yandan, RPO yapısının çiftli iplik toplam pull-out enerjisinin, KPO yapısına kıyasla %0,64 oranında daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Ek

olarak, gCPO yapısının üçlü iplik toplam pull-out enerjisi, PPO ya karşı %14,48 daha yüksek iken RPO ve KPO yapılarına kıyasla sırasıyla %53,73 ve %68,95 daha düşük olarak kaydedilmiş ve anlamlı bir azalış göstermiştir. Buna karşılık, RPO yapısının üçlü iplik toplam pull-out enerjisinin, KPO yapısına göre %9,90 oranında daha düşük olduğu gözlenmiştir. gCPO'nun tekli pull-out enerji sönümleme performansının diğerlerine göre yüksek olmasına karşın çoklu pull-out enerji değerlerinin düşük olması, filament demetlerinin kumaş yapısında CNTs büyütmesi esnasında yüksek işlem sıcaklığı nedeni ile muhtemelen kimyasal olarak moleküler seviyedeki bozunma nedeni ile iplik uç sayısının artması, bunun çekme dayanım değerlerini (tensile strength) düşürmesi sonucunda yüksek sürtünme nedeni ile pull-out çekimi esnasında çoklu iplik uç kırılmasından dolayı ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak, CNTs büyütmeli kumaş yapılarının tekli ve çoklu iplik pull-out enerjileri içerisinde en yüksek enerji sönümleme bölgeleri, azalan sırayla; tutunma-kayma enerjisi (aşama III), krimp uzama enerjisi (aşama I) ve ilk iplik çıkma kuvvet enerjisi (aşama II) olarak tanımlanmıştır. CNTs büyütmeli yapının, bu enerji bölgelerinin tümünde enerji yutumu açısından tekli çekimlerde iyileştirici etkiler gösterdiği ancak çoklu çekimlerde enerji sönümleme performanslarının kontrol yapıya göre düşük olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, plazma işlemlili yapıların da kontrol yapıya ve kimyasalı uzaklaştırılmışlara göre daha kötü bir enerji sönümleme performansı göstermiştir.

4.1.4. Nano kaplama, CVD ve PECVD işlemlili soft para-aramid kumaşlarda sürtünme sonuçları

4.1.4.1. Statik sürtünme sonuçları

Nanokaplanmış p-aramid kumaş yapılarına ait tekli ve çoklu (2 ve 3 uçlu) ipliklerin kuru ve ıslak durumlarındaki statik sürtünme katsayısı sonuçları, Microsoft Excel 2016 kullanılarak hesaplanmıştır. Şekil 4.9(a-c), çeşitli nanokaplı p-aramid kumaş yapılarına ait tekli ve çoklu ipliklerin kuru ve ıslak statik sürtünme katsayısı sonuçlarını göstermektedir.



Şekil 4.9. Nano kaplama p-aramid kumaş yapılarında tek ve çoklu kuru ve yağ statik sürtünme katsayıları. (a) Tek iplik statik sürtünme katsayısı, (b) İki iplik statik sürtünme katsayısı ve (c) Üç iplik static sürtünme katsayısı.

Şekil 4.9(a-c)'da gösterildiği üzere, tüm nanokaplı kumaş yapılarında tekli iplikler için statik sürtünme katsayısı kuru durumda 0,142 ile 0,314 arasında değişim gösterirken, ıslak durumda ise bu değerlerin 0,157 ile 0,306 aralığında değiştiği gözlenmiştir. İkili iplik formunda, statik sürtünme katsayısı kuru ortamda 0,145 ile 0,320 arasında, ıslak ortamda ise 0,171 ile 0,306 arasında elde edilmiştir. Ayrıca, üçlü iplik formunda statik sürtünme katsayısı kuru durumda 0,153 ile 0,333, ıslak durumda ise 0,182 ile 0,329 arasında değişmiştir.

BPO yapısına ait tekli ipliklerin kuru statik sürtünme katsayısı, MPO'ya kıyasla %45,37 oranında anlamlı bir artış sergilemiş; ayrıca GPO ve KPO yapılarına göre sırasıyla 2,21 kat ve %40,40 oranında daha yüksek bulunmuştur. Buna karşılık, GPO'nun tekli ipliklerine ait kuru statik sürtünme katsayısı, KPO'ya kıyasla %36,32 oranında daha düşük gözlenmiştir. İkili iplik formu değerlendirildiğinde, BPO yapısının kuru statik sürtünme katsayısı; MPO, GPO ve KPO yapılarına kıyasla sırasıyla %37,93, 2,20 kat ve %40,97 oranlarında anlamlı düzeyde daha yüksek tespit edilmiştir. Öte yandan, GPO'nun ikili ipliklerine ait kuru statik sürtünme katsayısı, KPO'ya göre %36,12 oranında daha düşük olarak belirlenmiştir. İlaveten, üçlü iplik formunda BPO yapısının kuru statik sürtünme katsayısı, MPO, GPO ve KPO yapılarına kıyasla sırasıyla %33,73, 2,17 kat ve %35,92 oranında kayda değer bir artış sergilemiştir. Diğer taraftan, GPO yapısının üçlü iplik kuru statik sürtünme katsayısı, KPO'ya göre %37,55 oranında daha düşük tespit edilmiştir.

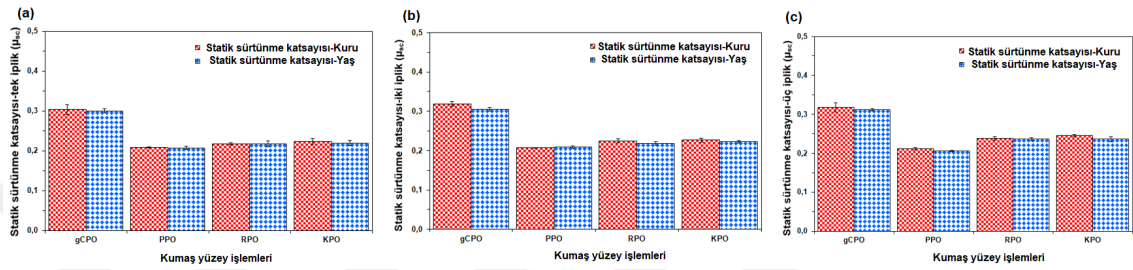
En yüksek sürtünme katsayısı, hem tekli hem de çoklu iplik formunda h-B₄C nanoparçacıkları ile kaplanmış yapılardan elde edilmiştir; bunu sırasıyla MWCNTs, kontrol grubu ve GNPs kaplı örnekler takip etmiştir. Bu olgunun, h-B₄C nanoparçacıklarının para-aramid filamentleri içerisinde, özellikle yüzey ve boşluk bölgelerinde homojen dağılması ile birlikte, bu parçacıkların boyut ve geometrik

özelliklerinin ilgili filament yüzey topografyasını [78] etkilemesinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir (Şekil 3.1b,d). Sonuç olarak, nano-nano ve nano-filament yüzey etkileşimleri yoluyla sürtünmenin artması, kuru sürtünme katsayısının yükselmesine neden olmuştur. Bu bulgu, h-B4C nanoparçacıklarının özellikle krimp uzama bölgesinde (Aşama I) enerji sönümleme mekanizmalarına katkı sağlayarak, soft balistik uygulamalarda destekleyici bir rol üstlenebileceğini göstermektedir [86]. Öte yandan, GNP'lerin kumaş yapısına katkısı, büyük ölçüde nanoplateletler ile filament-nano arayüzeyleri arasındaki düzgün yüzey etkileşimlerinden dolayı, yağlayıcı bir etki sağladığı şeklinde yorumlanmıştır. Bu etkileşim, kayma mekanizmalarını kolaylaştırmakta ve böylece GNP kaplı örneklerin sürtünme katsayısının düşmesine neden olmaktadır.

BPO yapısına ait tekli ipliklerin ıslak statik sürtünme katsayısı, MPO'ya kıyasla %47,83 oranında belirgin bir artış göstermiş olup, GPO ve KPO yapılarına göre sırasıyla %94,90 ve %39,73 daha yüksek bulunmuştur. Buna karşılık, GPO yapısına ait tekli ipliklerin ıslak statik sürtünme katsayısı, KPO yapısına kıyasla %28,31 daha düşük olarak tespit edilmiştir. İkili iplik formunda, BPO'nun ıslak statik sürtünme katsayısı MPO, GPO ve KPO yapılarına kıyasla sırasıyla %35,40, %78,95 ve %37,22 oranlarında anlamlı derecede daha yüksek bulunmuştur. Öte yandan, GPO'nun ikili ipliklere ait ıslak statik sürtünme katsayısı, KPO'ya kıyasla %23,32 oranında daha düşük olarak belirlenmiştir. Ayrıca, üçlü iplik formuna ait BPO yapısının ıslak statik sürtünme katsayısı; MPO, GPO ve KPO yapılarına göre sırasıyla %34,84, %80,77 ve %39,41 oranlarında kayda değer bir artış sergilemiştir. Buna karşılık, GPO'nun üçlü iplik formuna ait ıslak statik sürtünme katsayısı, KPO'ya kıyasla %22,88 oranında daha düşük olarak saptanmıştır. En yüksek ıslak sürtünme katsayısı, h-B4C nanoparçacıkları ile kaplanmış hem tekli hem de çoklu iplik yapılarında kaydedilmiş; bunu sırasıyla MWCNT'ler, kontrol numuneleri ve GNP'ler takip etmiştir. Ayrıca, GNP kaplı kumaş yapısında gözlemlenen düşük ıslak sürtünme katsayısı, nanoplateletlerin hem birbirleri üzerinde hem de filament yüzeyleri boyunca kayma eğiliminin artmasına atfedilmekte olup, bu durumun nem etkisiyle daha da belirginleştiği düşünülmektedir [47]. Şekil 4.9'da gösterildiği üzere, nh-B4C ve MWCNTs kaplı kumaşlar ile kontrol numunelerine ait ıslak sürtünme katsayıları, kuru durumdakilere kıyasla belirgin bir azalma eğilimi sergilemiştir. Buna karşılık, GNPs kaplı yapı ıslak sürtünmede belirgin bir artış göstermiştir. Buna ek olarak, iplik ucu sayısındaki

değişimin hem kuru hem de ıslak koşullarda sürtünme katsayısı üzerinde anlamlı bir etkisinin bulunmadığı ve olağan dışı bir artışın elde edilmediği tespit edilmiştir.

Öte yandan, Şekil 4.10(a-c), CVD ile CNTs büyütme, plazma işlemli ve yüzey kimyasal uzaklaştırılmış p-aramid kumaş yapılarına ait tekli ve çoklu ipliklerin kuru ve ıslak statik sürtünme katsayısı sonuçlarını göstermektedir.



Şekil 4.10. CVD ve PECVD işlemli p-aramid kumaş yapılarda tek ve çoklu kuru ve yaş statik sürtünme katsayıları. (a) Tek iplik statik sürtünme katsayısı, (b) İki iplik statik sürtünme katsayısı ve (c) Üç iplik statik sürtünme katsayısı.

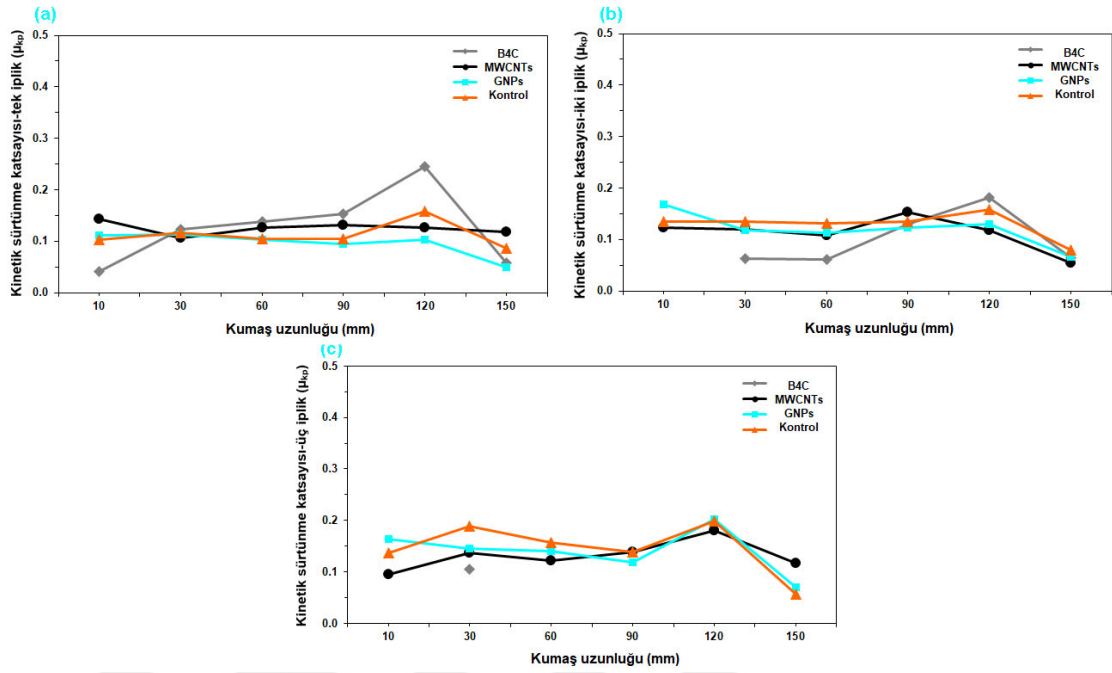
Şekil 4.10'da gösterildiği üzere, tüm işlem görmüş kumaş yapılarında tekli iplikler için statik sürtünme katsayısı kuru ve yaş durumunda 0,21 ile 0,30 arasında değiştiği gözlenmiştir. İkili iplik formunda, statik sürtünme katsayısı kuru ortamda 0,22 ile 0,32 arasında, ıslak ortamda ise 0,209 ile 0,305 arasında elde edilmiştir. Ayrıca, üçlü iplik formunda statik sürtünme katsayısı kuru durumda 0,21 ile 0,32, ıslak durumda ise 0,21 ile 0,31 arasında değişmiştir. gCPO yapısına ait tekli ipliklerin kuru statik sürtünme katsayısı, PPO'ya kıyasla %30 oranında anlamlı bir artış sergilemiş; ayrıca RPO ve KPO yapılarına göre aynı %26,67 oranında daha yüksek bulunmuştur. Buna karşılık, RPO'nun tekli ipliklerine ait kuru statik sürtünme katsayısı, KPO ile eşdeğer bulunmuştur. İkili iplik konfigürasyonları açısından değerlendirildiğinde, gCPO yapısının kuru statik sürtünme katsayısı; PPO, RPO ve KPO yapılarına kıyasla sırasıyla %31,25 ve aynı %28,13 oranlarında anlamlı düzeyde daha yüksek tespit edilmiştir. Öte yandan, RPO'nun ikili ipliklerine ait kuru statik sürtünme katsayısı, KPO' ile eşdeğer bulunmuştur. İlave, üçlü iplik konfigürasyonunda gCPO yapısının kuru statik sürtünme katsayısı, PPO, RPO ve KPO yapılarına kıyasla sırasıyla %34,38, %25 ve %21,88 oranında bir artış sergilemiştir. Diğer taraftan, RPO yapısının üçlü iplik kuru statik sürtünme katsayısı, KPO'ya göre %4,17 oranında daha düşük tespit edilmiştir. En yüksek kuru sürtünme katsayısı, hem tekli hem de çoklu iplik formlarında CNTs büyütülmüş yapılardan elde

edilmiştir; bunu sırasıyla KPO, RPO ve PPO örnekler takip etmiştir. Bu olgunun, carbon nanotüplerin filament yüzeylerini tüylendirmesi ile sürtünme alanlarını artırması ile ilgili olduğu tespit edilmiştir (Şekil 3.8d) [274]. Sonuç olarak, carbon nanotüp-nanotüp ve nanotüp-filament yüzey etkileşimleri yoluyla sürtünmenin artması, kuru sürtünme katsayısının yükselmesine neden olmuştur.

gCPO yapısına ait tekli ipliklerin ıslak statik sürtünme katsayısı, PPO'ya kıyasla %30 oranında anlamlı bir artış sergilemiş; ayrıca RPO ve KPO yapılarına göre aynı %26,67 oranında daha yüksek bulunmuştur. Buna karşılık, RPO'nun tekli ipliklerine ait ıslak statik sürtünme katsayısı, KPO ile eşdeğer bulunmuştur. İkili iplik formları açısından değerlendirildiğinde, gCPO yapısının ıslak statik sürtünme katsayısı; PPO, RPO ve KPO yapılarına kıyasla sırasıyla %31,48, %28,52 ve %26,89 oranlarında daha yüksek tespit edilmiştir. Öte yandan, RPO'nun ikili ipliklerine ait ıslak statik sürtünme katsayısı, KPO'ye karşın %2,29 daha düşük bulunmuştur. İlaveten, üçlü iplik konfigürasyonunda gCPO yapısının ıslak statik sürtünme katsayısı, PPO, RPO ve KPO yapılarına kıyasla sırasıyla %32,26 ve aynı %22,58 oranda bir artış sergilemiştir. Diğer taraftan, RPO yapısının üçlü iplik kuru statik sürtünme katsayısı, KPO'ya göre eşdeğer olarak elde edilmiştir. En yüksek ıslak sürtünme katsayısı, hem tekli hem de çoklu iplik konfigürasyonlarında CNTs büyütülmüş yapılardan elde edilmiştir; bunu sırasıyla KPO, RPO ve PPO örnekler takip etmiştir. Bu olgunun, carbon nanotüplerin filament yüzeylerini tüylendirmesi ile sürtünme alanlarını artırması ile ilgili olduğu tespit edilmiştir (Şekil 3.8d). Sonuç olarak, carbon nanotüp-nanotüp ve nanotüp-filament yüzey etkileşimleri yoluyla sürtünmenin artması, ıslak sürtünme katsayısının yükselmesine neden olmuştur. Ayrıca, işlem görmüş soft kumaş yapıların kuru ve ıslak sürtüne katsayıları benzer trend değişim göstermiştir. Buna ek olarak, iplik ucu sayısındaki değişimin hem kuru hem de ıslak koşullarda sürtünme katsayısı üzerinde sıradışı bir etkisinin bulunmadığı ve olağan dışı bir değişimin elde edilmediği tespit edilmiştir.

4.1.4.2. Kinetik sürtünme sonuçları

Şekil 4.11(a-c), çeşitli nanokaplı p-aramid kumaş yapılarına ait kuru dinamik sürtünme katsayısı sonuçlarını göstermektedir.



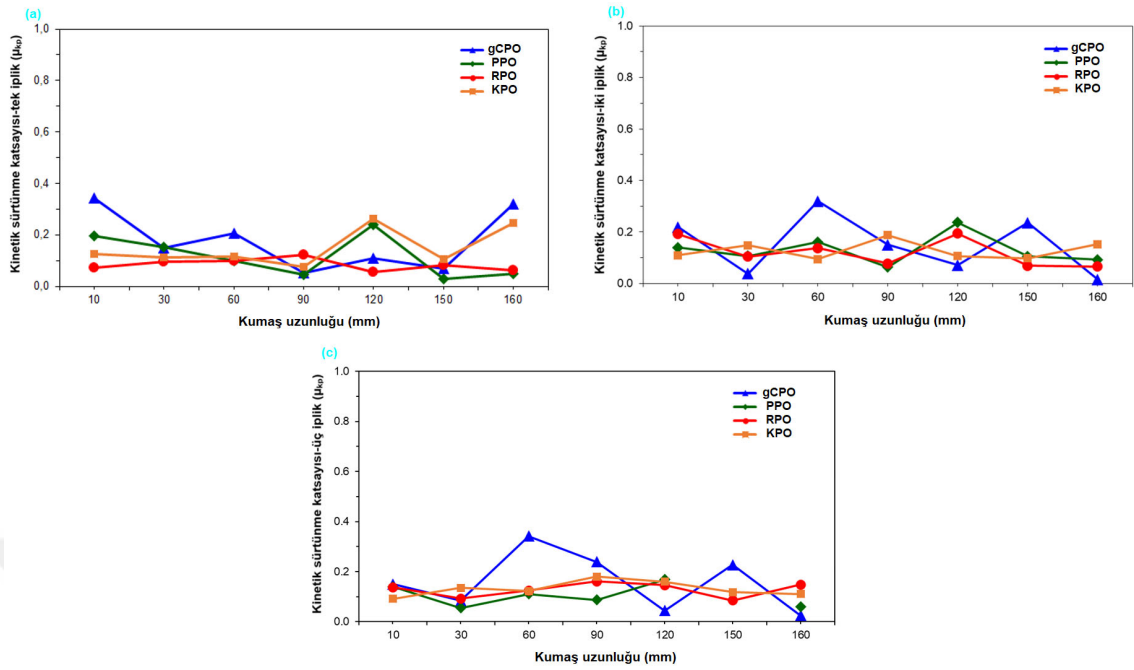
Şekil 4.11. Nano kaplama p-aramid kumaş yapılarda tek ve çoklu kuru kinetik sürtünme katsayıları. (a) Tek iplik kinetik sürtünme katsayısı, (b) İki iplik kinetik sürtünme katsayısı ve (c) Üç iplik kinetik sürtünme katsayısı.

Şekil 4.11(a-c)'de gösterildiği üzere, tüm nanokaplı kumaş yapılarında tekli ve ikili iplikler için kuru kinetik (dinamik) sürtünme katsayısı 0,10 ile 0,13 arasında değişim göstermektedir. Ayrıca, üçlü iplik konfigürasyonlarında ise kuru ortamda dinamik sürtünme katsayısının 0,10 ile 0,15 arasında değiştiği tespit edilmiştir. BPO yapısına ait tekli ipliklerin kuru dinamik sürtünme katsayısı, MPO yapısına kıyasla ihmal edilebilir düzeyde (%0,8) bir artış sergilemiş olup, GPO ve KPO yapılarına göre sırasıyla %31,25 ve %12,50 oranlarında daha yüksek bulunmuştur. Buna karşılık, GPO yapısının tekli ipliklerindeki kuru dinamik sürtünme katsayısı, KPO yapısına kıyasla %14,29 oranında daha düşük tespit edilmiştir. Diğer taraftan, BPO yapısına ait ikili ve üçlü ipliklerin kuru dinamik sürtünme katsayısı, MPO, GPO ve KPO yapılarına göre %11,50 ila %28,77 aralığında hafifçe daha düşük değerler sergilemiştir. Ayrıca, GPO yapısının ikili ve üçlü ipliklerindeki kuru dinamik sürtünme katsayısı, KPO yapısına kıyasla sırasıyla %6,98 ve %4,11 oranlarında daha düşük olarak belirlenmiştir. En yüksek kuru dinamik sürtünme katsayısı, tekli ipliklerde h-B4C nanoparçacıkları ile kaplanmış yapıda gözlenmiş olup, bunu sırasıyla MWCNT'ler, kontrol yapısı ve GNP'ler takip etmiştir. Öte yandan, ikili ve üçlü iplik konfigürasyonlarında en yüksek kuru dinamik sürtünme katsayısı kontrol yapısında kaydedilmiş; bunu sırasıyla GNP'ler ve MWCNT'ler izlemiştir.

Tekli iplik dinamik sürtünme katsayısı, kumaşın tutunma-kayma (aşama III) bölgesinde her 10 mm’de bir maksimum ve minimum kuvvet değerlerinin Eşitlik (2.8), kapstan bağıntısı, kullanılarak hesaplanmasıyla belirlenmiş olup, özellikle 60–90 mm aralığında kumaş uzunluğu boyunca istikrarlı ve neredeyse yatay eksene paralel bir seyir göstermiştir. Bu aralık, ipliğin neredeyse tamamen öteleme hareketi gerçekleştirdiği kumaşın orta kısmına karşılık gelmekte olup, tutunma-kayma evresinin başlangıç ve bitiş bölgelerinden farklılık arz etmektedir. İkili ve üçlü iplik konfigürasyonlarında elde edilen dinamik sürtünme katsayısı değerleri ise, kumaş yapısının kümülatif etkileşiminden kaynaklanan hafif sapmalar sergilemiş olsa da, genel sürtünme prensipleri ile uyumluluk göstermiştir. Bu fenomenler, kuru statik sürtünme durumunda gözlemlendiği üzere, benzer şekilde, kullanılan nano katkı türü, nanoparçacıkların filament içerisindeki dağılımı ve belirli ölçüde parçacıkların geometrik özelliklerinin etkisiyle de açıklanmıştır.

Ayrıca, tek iplikli kuru statik ve kinetik sürtünme katsayılarının karşılaştırılması sonucunda, kinetik sürtünme katsayısının statik sürtünme katsayısından daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bu gözlem, literatürdeki bulgularla [49,67,77,83] örtüşmekte olup, söz konusu durumun; nano-nano ve nano-filament arayüzleri arasındaki karmaşık etkileşimlerden kaynaklanan sürekli kayma temelli sürtünme davranışına atfedildiği düşünülmektedir.

Öte yandan, Şekil 4.12(a-c)’ de CVD, PECVD işlemleri ve yüzey kimyasalı uzaklaştırılmış p-aramid kumaş yapılarında tek ve çoklu kuru kinetik sürtünme katsayıları görülmektedir.



Şekil 4.12. CVD, PECVD işlemlili ve yüzey kimyasalı uzaklaştırılmış p-aramid kumaş yapılarında tek ve çoklu kuru kinetik sürtünme katsayıları. (a) Tek iplik kinetik sürtünme katsayısı, (b) İki iplik kinetik sürtünme katsayısı ve (c) Üç iplik kinetik sürtünme katsayısı.

Şekil 4.12(a-c)'de gösterildiği üzere, tüm CNTs büyütme, plazma işlemlili ve kimyasalı uzaklaştırılmış kumaş yapılarında tekli iplikler için kuru kinetik (dinamik) sürtünme katsayısı 0,08 ile 0,18 arasında değişim göstermektedir. Öte yandan, ikili iplikler için kuru kinetik sürtünme katsayısı 0,12 ile 0,15 arasında değişim göstermektedir. Ayrıca, üçlü iplik konfigürasyonlarında ise kuru ortamda dinamik sürtünme katsayısının 0,10 ile 0,16 arasında değiştiği tespit edilmiştir.

gCPO yapısına ait tekli ipliklerin kuru dinamik sürtünme katsayısı, PPO yapısına kıyasla %33,33 daha yüksek düzeyde bir artış sergilemiş olup, RPO ve KPO yapılarına göre sırasıyla %55,56 ve %16,67 oranlarında daha yüksek bulunmuştur. Buna karşılık, RPO yapısının tekli ipliklerindeki kuru dinamik sürtünme katsayısı, KPO yapısına kıyasla %87,5 oranında daha düşük tespit edilmiştir. Diğer taraftan, gCPO yapısına ait ikili ve üçlü ipliklerin kuru dinamik sürtünme katsayısı, PPO, RPO ve KPO yapılarına göre %13,33 ila %37,5 aralığında daha yüksek değerler sergilemiştir. Ayrıca, RPO yapısının ikili ipliklerindeki kuru dinamik sürtünme katsayısı, KPO yapısına kıyasla sırasıyla %8,33 daha düşük ancak üçlü ipliklerde eşit olarak belirlenmiştir. En yüksek kuru dinamik sürtünme katsayısı, tekli ipliklerde CNTs büyütülmüş ile işlem görmüş yapıda

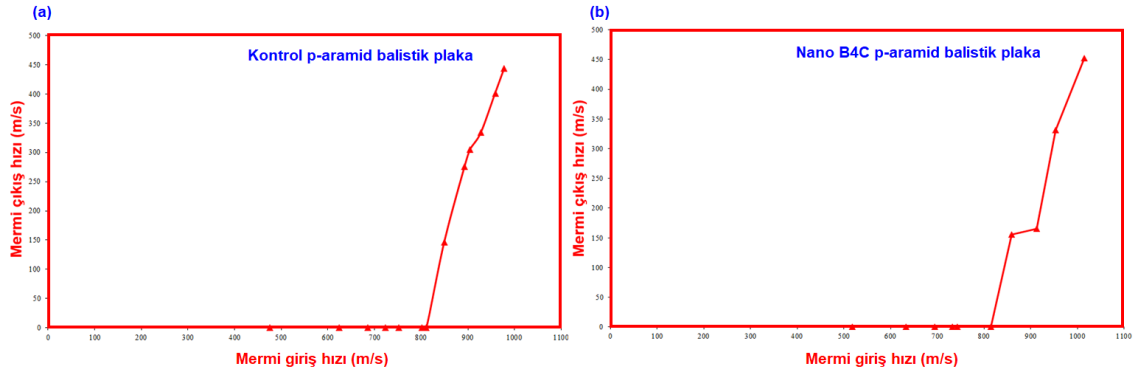
gözenmiş olup, bunu sırasıyla kontrol, plazma işlemi ve kimyasalı uzaklaştırılmış yapılar takip etmiştir. Öte yandan, ikili ve üçlü iplik konfigürasyonlarında en yüksek kuru dinamik sürtünme katsayısı CNTs büyütülmüş yapıda kaydedilmiş; bunu sırasıyla kontrol, plazma ve kimyasalı uzaklaştırılmış yapılar izlemiştir.

Tekli ve çoklu iplik dinamik sürtünme katsayısı, p-aramid filament yüzeyinde büyütülen CNTs den etkilenecek diğer işlemler yapılarına göre sürtünme alanı ve yüzey pürüzlülüğünü artırması nedeni ile yüksek çıkmıştır. Ayrıca, tek iplikli kuru statik ve kinetik sürtünme katsayılarının karşılaştırılması sonucunda, kinetik sürtünme katsayısının statik sürtünme katsayısından daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bu durumun; dolaylı olarak filament yüzey işlemlerinden kaynaklandığı ancak temel prensibin dinamik sürtünme olayındaki yüzeylerin yüksek kuvvet altında sürekli kayma temelli sürtünme davranışı ile ilgili olduğu açık literatürler de göz önüne alınarak tespit edilmiştir.

4.1.5. Para-aramid/epoksi/nh-B₄C balistik plaka atış sonuçları

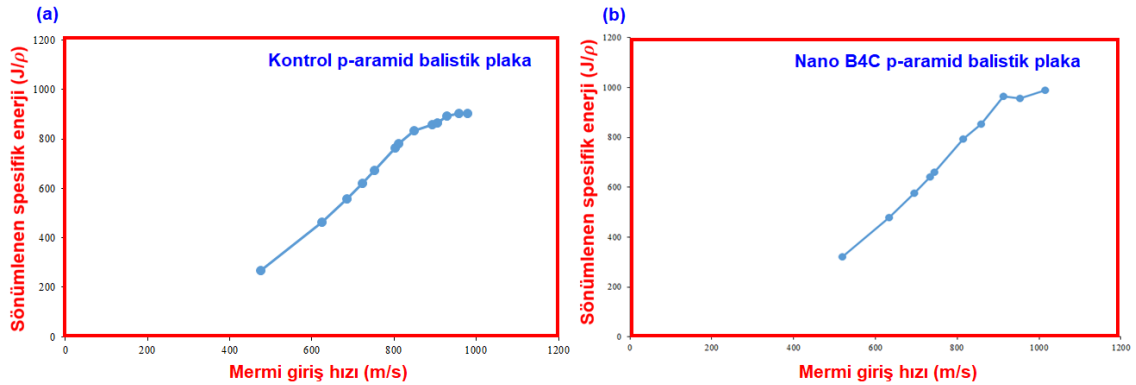
4.1.5.1. Mermi giriş-çıkış hızları ve enerji sönümleme

Şekil 4.13(a-b), parçacık tesirli mermi (FSP) etkisi altında para-aramid/epoksi/nh-B₄C (NBB8) ve kontrol (NBK8) balistik plakada farklı hızlardaki mermi giriş ve çıkış hızlarını(m/s) göstermektedir. Şekil 4.13(a-b)'den görüleceği üzere hem nano borkarbür p-aramid/epoksi plaka ve hem de kontrol plaka mermi giriş ve çıkış hızları üzerinden orantılı bir davranış göstermişlerdir. Ayrıca, kontrol 475 m/s den 811 m/s hızdaki FSP leri tutarken nano borkarbür eklentili plaka 515,6 m/s den 814,6 m/s hızdaki FSP leri tutmuştur. Nano h-B₄C eklemeli plaka kontrol plakaya göre mermi hızının tutma performansı üzerinden değerlendirildiğinde, % 1 in altında bir artış göstermiş ve bu kayda değer görülmemiştir.



Şekil 4.13. Parçacık tesirli mermi etkisi altında para-aramid/epoksi/nh-B4C balistik plaka daki farklı hızlardaki mermi giriş ve çıkış hızları(m/s). (a) Kontrol plaka ve (b) para-aramid/epoksi/nh-B4C balistik plaka.

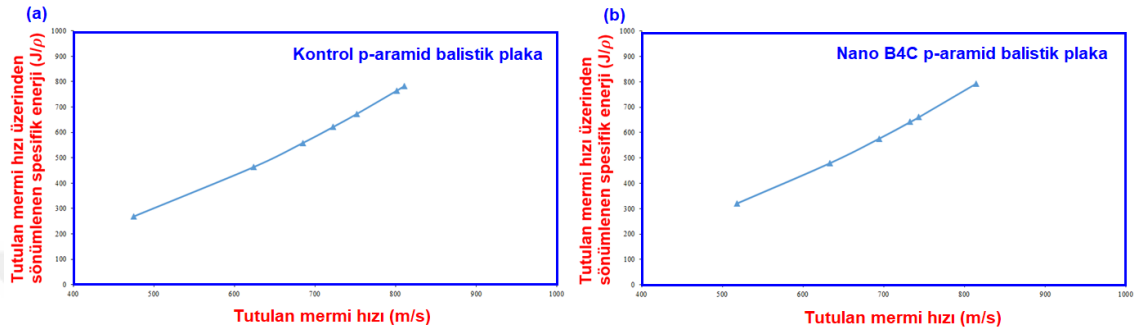
Şekil 4.14(a-b), parçacık tesirli mermi etkisi altında para-aramid/epoksi/nh-B4C balistik plaka daki farklı mermi giriş hızlarına(m/s) karşılık sönümlenen spesifik enerji(J) değerlerini göstermektedir. Şekil 4.14(a-b)' den görüleceği üzere hem nano bor karbür eklemeli plakada ve hem de kontrol plakasında mermi giriş hızı arttıkça sönümlenen spesifik enerjide artış tespit edilmiştir. Bu artış mermi hızı arttıkça bariz bir doğrusal olmayan ilişki olarak kendisini göstermiştir. Mermi hızı 600-700 m/s' nin üzerinde doğrusal olmayan enerji sönümleme olayı kendisini göstermiştir.



Şekil 4.14. Parçacık tesirli mermi etkisi altında para-aramid/epoksi/nh-B4C balistik plaka daki farklı mermi giriş hızlarına(m/s) karşılık sönümlenen spesifik enerji(j). (a) Kontrol plaka ve (b) para-aramid/epoksi/nh-B4C balistik plaka.

Şekil 4.15(a-b), tutulan mermi hızı(m/s) üzerinden sönümlenen spesifik enerji(J) grafiklerini hem NBB8 ve hem de NBK8 plakaları için ifade etmektedir. Şekil 4.15(a-b)'

den görüleceği üzere tutulan mermi üzerinden sönmölen enerji ve tutulan mermi hızları arasında yine çok hafif bir doğrusal olmayan ilişki belirlenmiştir. Bu muhtemel mermi hızı artsada enerji sönmölenmesinde önemli bir artış olmayacağı olarak yorumlanmıştır.



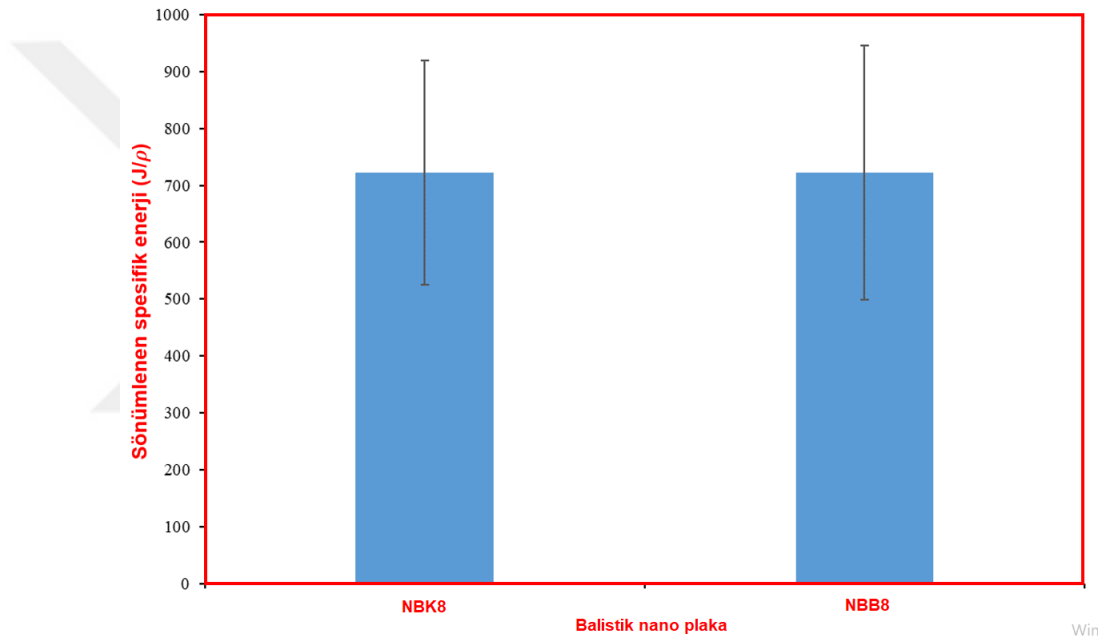
Şekil 4.15. Tutulan mermi hızı(m/s) üzerinden sönmölen spesifik enerji(J) ve tutulan mermi hızı grafiğı. (a) Kontrol plaka ve (b) para-aramid/epoksi/nh-B₄C balistik plaka.

Şekil 4.16'da ise para-aramid/epoksi/nh-B₄C balistik plaka ve kontrol plaka için sönmölen ortalama spesifik enerji grafiğı görölmektedir. Buradan göröleceğı üzere nano borkarbürün p-aramid/epoksinin yüksek hızda (high strain rate) plakaya katkısının etkileri kontrole kıyasla nerdeyse ihmal edilebilir bir seviyede olduğı şeklinde kendisini göstermektedir. Ancak, nano borkarbür etkilerinin düşük hızda (low strain rate) belki de daha etkin sonuçlar vereceğı ileri sürölebilir. Bunun için ileriye dönelik daha detaylı çalışmaların yapılmasına gereksinim vardır.

Öte yandan nano borkarbür plakanın atış sonrası bozunma modları kontrol plaka ile karşılaştırılmıştır. Buradan göröleceğı üzere atış sonrası, NBB8 nin üst koni boyut çapı ve bozunma alanı (merminin ilk girdiğı bölge) ve alt koni boyut çapı ile bozunan alanı (merminin tutulduğı katman yada çıktığı bölge) NBK8 ya göre daha büyük çıkmıştır (Tablo 3.9 ve Tablo 3.13). Bunun fiziksel anlamı para-aramid/epoksi yapıya nano borkarbürün eklenmesi ile yapının hasar bölgesi düzlemde (in-plane) artmıştır. Aksine olarak, çıkan lif yüksekliğinde belirgin bir azalma pull-out şeklinde kendisini göstererek düzlem dışında (out-of plane) daha düşük şekil değışimi elde edilmiştir.

Ayrıca, atış görüntü videoları izlendiğinde ve elde edilen ölçüm verilerinden merminin NBB8 yapı içinde hareketi esnasında çözğü ve atkı yönündeki şekil değışimleri (düzlem

içinde), NBK8 plakasına göre daha yüksek çıkmasına karşın kalınlık yönündeki (düzlem dışı) şekil değişimi daha düşük çıkmıştır (Tablo 3.11 ve Tablo 3.15). Bu sonuçlardan nano bor karbür eklenmesi düzlemdeki enerji yutumunu artırarak katarası şekil değişimlerini sınırlamıştır. Bunda her bir katmanın nh-B₄C/epoksi ile yapıştırılmasının da etkisinin olduğu söylenebilir. Böylelikle, hasar toleransı iyileştirilmiş bir malzeme olarak davrandığı ortaya çıkmıştır. Bu önemli bir sonuç olarak değerlendirilmiştir. Ancak, daha detaylı ileriye yönelik araştırmaların özellikle ileri hesaplama teknikleri (örneğin FEM esaslı LS-DYNA) üzerinden yapılmasına gereksinim vardır.

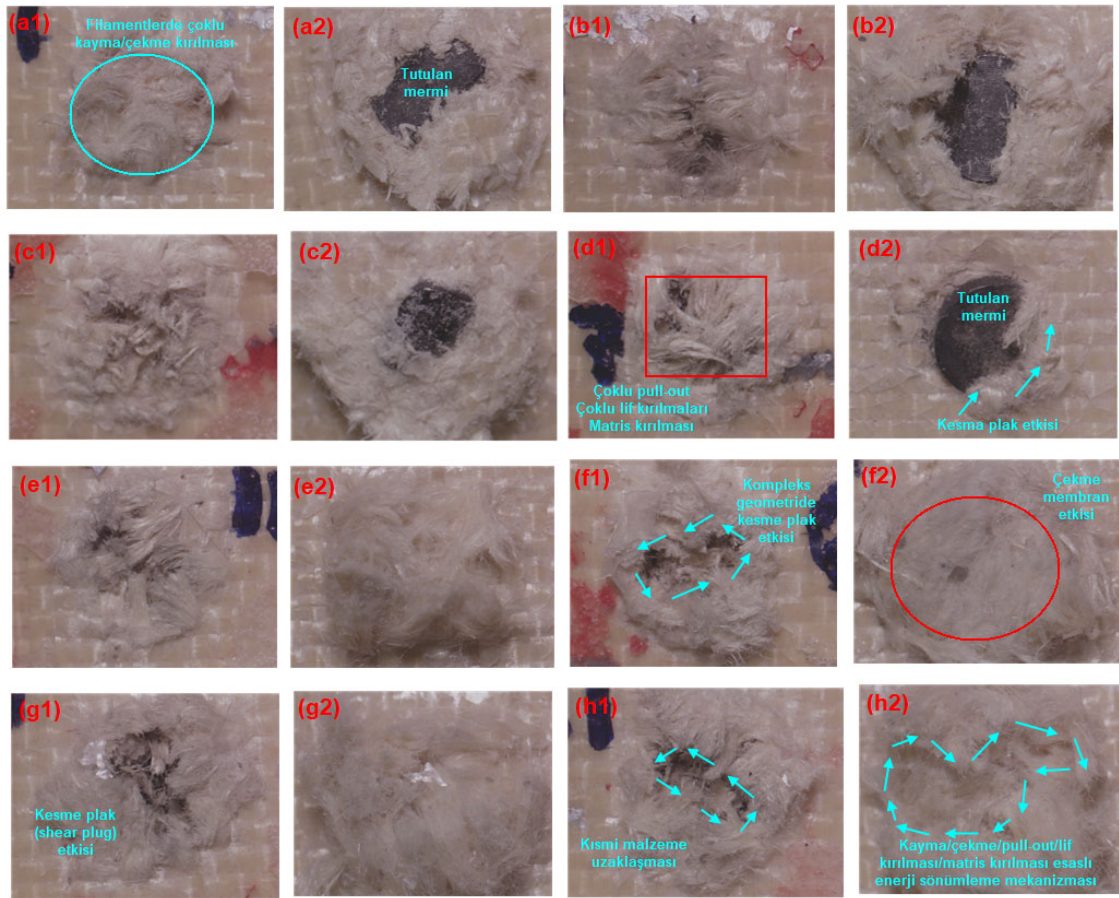


Şekil 4.16. Para-aramid/epoksi/nh-B₄C balistik plaka ve kontrol plaka için sönümlenen spesifik enerji.

4.1.5.2. Para-aramid/epoksi/nh-B₄C balistik plaka bozunma modları

Şekil 4.17(a1-h2), para-aramid/epoksi balistik plaka için farklı parçacık tesirli mermi hızları ile elde edilen bozunma modları optik mikroskop görüntüleri ile birlikte verilmiştir. Şekil 4.17’den görüleceği üzere kontrol (NBK8) plakasının bozunma modları 475 m/s, 685 m/s ve 752 m/s mermi hızlarında her katmanın ön yüzeyinde bölgesel çözgü ve atkı ipliklerinde çoklu filament kırılması, matriks kırılması ve ipliklerde pull-out’larla kendisini göstermiştir (Şekil 4.17.a1, b1, c1). Merminin tutulduğu katmanlarda ise bölgesel matriks bozunması ve tamamı ile çözgü-atkı ipliklerinde kırılması sonucu dışa doğru pull-out açılması şeklinde çekme membran davranışı sergilemiştir (Şekil 4.17.a2,

b2, c2). 811 m/s limit mermi hızında ise kontral yapısının ön yüzeyinde tamamı ile çoklu çözgü-atkı iplik kırılmaları, matriks kırılmaları ve çoklu pull-out etkileri kendisini göstermiştir (Şekil 4.17.d1). Arka yüzünde ise merminin tutulduğu ancak kısmen kesme plak (shear plug) etkisinin ortaya çıktığı tespit edilmiştir (Şekil 4.17.d2). 849 m/s de ise yapının ön yüzünde kesme plak esaslı kütle kaybı (Şekil 4.17.e1) ve arka yüzeyinde bölgesel çoklu iplik ve iplik içerisindeki filamentlerde kırılma ile matriks kırılmaları ve yapı kalınlığı dışına doğru pull-out etkileri tespit edilmiştir (Şekil 4.17.e2). 905 m/s de yapının ön yüzeyinde daha karmaşık geometride kesme plak esaslı şekil değişimi (Şekil 4.17.f1) ve arka yüzeyinde çekme membran etkili toplam bozunma elde edilmiştir (Şekil 4.17.f2). 958,7 m/s de yapının ön yüzeyinde daha karmaşık geometride kütle kayıplı kesme plak esaslı şekil değişimi (Şekil 4.17.g1) ve arka yüzeyinde çekme membran etkili toplam bozunma elde edilmiştir (Şekil 4.17.g2). 978 m/s de yapının ön yüzeyinde daha ileri düzeyde kütle kayıplı kesme plak esaslı şekil değişimi (Şekil 4.17.h1) ve arka yüzeyinde kayma/çekme/pull-out/lif kırılması/matriks kırılması esaslı enerji sönmleme mekanizması esaslı bozunma modu elde edilmiştir (Şekil 4.17.h2).



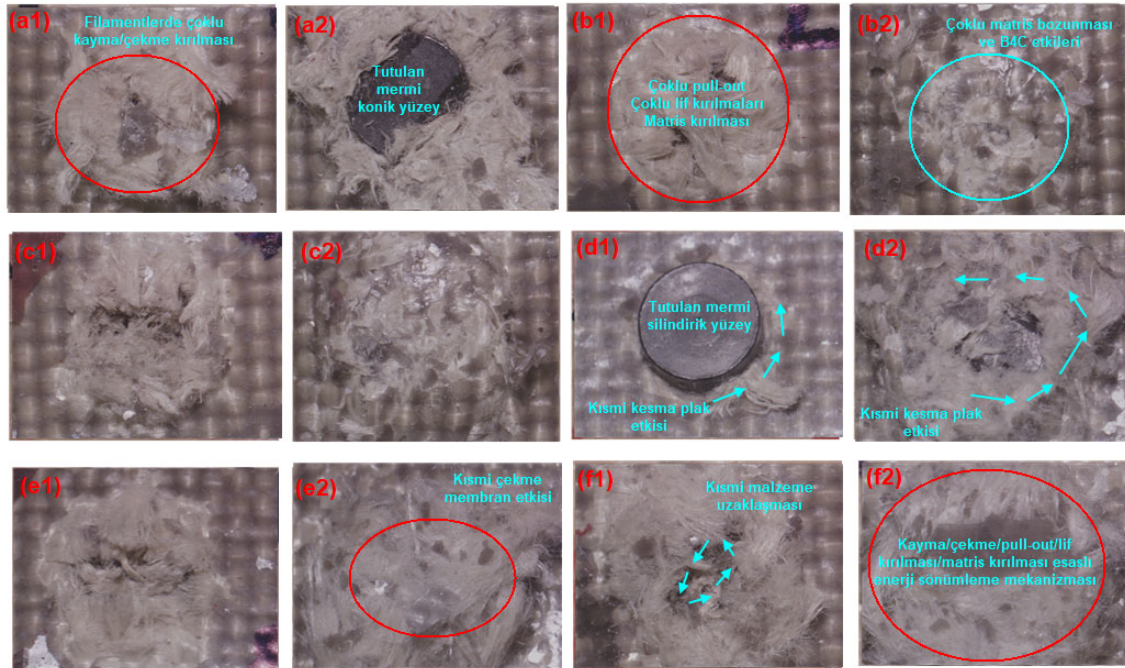
Şekil 4.17. Para-aramid/epoksi balistik plaka (kontrol) için farklı parçacık tesirli mermi hızları ile elde edilen bozunma modları (optik mikroskop, x6.7). (a1) Ön plaka bozunumu(475m/s), (a2) 3.plaka(475m/s), (b1) Ön plaka bozunumu(685m/s), (b2) 5.plaka(685m/s), (c1) Ön plaka bozunumu(752m/s), (c2) 6.plaka(752m/s), (d1) Ön plaka bozunumu(811m/s), (d2) 7.plaka(811m/s), (e1) Ön plaka bozunumu(849m/s), (e2) 8.plaka(849m/s), (f1) Ön plaka bozunumu(905m/s), (f2) 8.plaka(905m/s), (g1) Ön plaka bozunumu(958.7m/s), (g2) 8.plaka(958.7m/s), (h1) Ön plaka bozunumu(978m/s), (h2) 8.plaka(978m/s).

Şekil 4.18(a1-f2), para-aramid/epoksi/nh-B₄C balistik plaka için farklı parçacık tesirli mermi hızları ile elde edilen bozunma modları optik mikroskop görüntüleri ile birlikte verilmiştir. Şekil 4.18'den görüleceği üzere nh-B₄C (NBB8) plakasının bozunma modları 518,6 m/s, 633,2 m/s ve 732,7 m/s mermi hızlarında her katmanın ön yüzeyinde bölgesel çözgü ve atkı ipliklerinde çoklu filament kırılması, matriks kırılması ve ipliklerde kısmi pull-out larla kendisini göstermiştir (Şekil 4.18.a1, b1, c1). Merminin tutulduğu katmanlarda ise bölgesel matriks bozunması ve kısmi çözgü-atkı ipliklerinin kırılması sonucu dışa doğru sınırlı pull-out açılması şeklinde bozunma göstermiştir (Şekil 4.18.a2, b2, c2). 814,6 m/s limit mermi hızında ise kontral yapısının ön yüzeyinde kısmi kesme

plak etkisi kendisini göstermiştir (Şekil 4.18.d1). Arka yüzünde ise merminin tutulduğu ancak kısmen kesme plak (shear plug) etkisinin ortaya çıktığı tespit edilmiştir (Şekil 4.17.d2) ki burda çoklu çözü- atkı kırılması ve matriks kırılması kendisini bölgesel olarak göstermiştir. 913,4 m/s de ise yapının ön yüzünde kısmi kesme plak esaslı kütle kaybı (Şekil 4.18.e1) ve arka yüzeyinde bölgesel çoklu iplik ve iplik içerisindeki filamentlerde kırılma ile matriks kırılmaları ve yapı kalınlığı dışına doğru sınırlı pull-out etkileri tespit edilmiştir (Şekil 4.17.e2). 1015,2 m/s de yapının ön yüzeyinde daha ileri düzeyde kütle kayıplı kesme plak esaslı şekil değişimi (Şekil 4.18.f1) ve arka yüzeyinde kayma/çekme/pull-out/lif kırılması/matriks kırılması esaslı enerji sönmleme mekanizması esaslı bozunma modu elde edilmiştir (Şekil 4.18.f2).

Nano bor karbür katkılı ve katkısız balistik plakaların bozunma modlarının yukarıdaki analizinden, genellikle nh-B₄C nin epoksi üzerinden para-aramid lifli kumaşa aktarımı ile hasar toleransı iyileştirilmiş balistik plakaların elde edildiği sonucuna varılmıştır.

Daha ileriki çalışmalara özellikle nano parçacığın sürekli ortamdaki epoksi üzerinden yönlü mikro filamentsi yapı ile birlikte enerji absorplama mekanizmasının bozunma modlarını da içerecek şekilde akıllı hesaplama teknikleri ile (deep learning, machine learning gibi) analiz edilerek optimum nano balistik plakaların geliştirilmesi özellikle uzay araçlarının sürtünme esaslı kompleks termo-mekanik yüklerin üstesinden gelmesi için gerekli görülmektedir.



Şekil 4.18. Para-aramid/epoksi/nh-B4C balistik plaka için farklı parçacık tesirli mermi hızları ile elde edilen bozunma modları(optik mikroskop, x6.7). (a1) Ön plaka bozunumu(518.6m/s), (a2) 3.plaka(518.6m/s), (b1) Ön plaka bozunumu(633.2m/s), (b2) 5.plaka(633.2m/s), (c1) Ön plaka bozunumu(732.7m/s), (c2) 6.plaka(732.7m/s), (d1) Ön plaka bozunumu(814.6m/s), (d2) 7.plaka(814.6m/s), (e1) Ön plaka bozunumu(913.4m/s), (e2) 8.plaka(913.4m/s), (f1) Ön plaka bozunumu(1015.2m/s), (f2) 8.plaka(1015.2m/s).

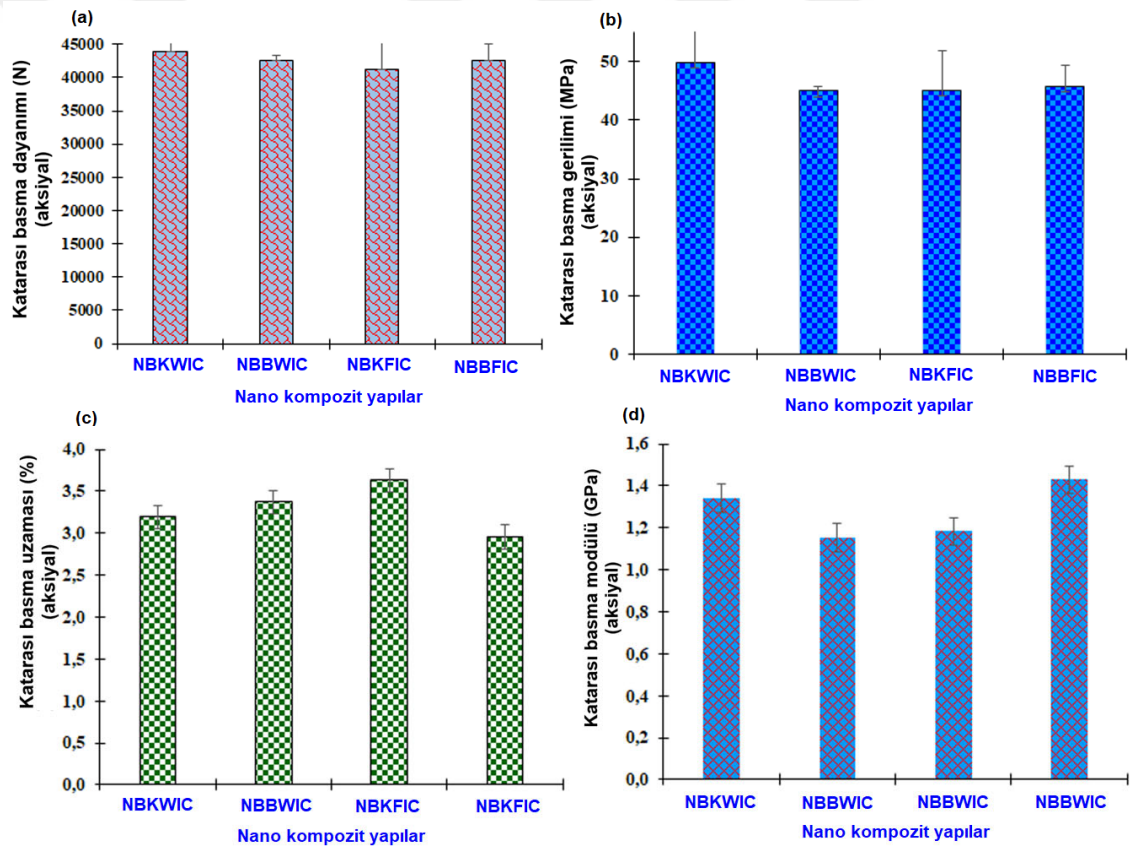
4.1.6. Para-aramid/epoksi nano kompozit katarası basma (aksiyal) sonuçları

4.1.6.1. Katarası basma(aksiyal) dayanımı, uzama ve modül sonuçları

Şekil 4.19(a-d)'de para-aramid/epoksi/nh-B4C nano ve kontrol kompozitlerin çözgü ve atkı kesiti boyunca (aksiyal) katarası basma sonuçları verilmiştir. Şekil 4.19(b-d) daki sonuçlardan görüleceği üzere, kontrol kompozitlerin çözgü yönü (NBKWIC) katarası basma (aksiyal) dayanım ve modül değerleri sırasıyla %9,60 ve %11,94 atkı yönüne (NBKFIC) göre yüksek çıkmasına karşın uzama değeri %13,79 düşük elde edilmiştir. Öte yandan nano borkarbür p-aramid kompozitin çözgü yönü (NBBWIC) katarası basma (aksiyal) dayanım ve modül değerleri sırasıyla %1,69 ve %24,35 atkı yönüne (NBBFIC) göre düşük çıkmasına karşın uzama değeri %12,17 yüksek elde edilmiştir. Ayrıca, kontrol kompozitin çözgü yönü (NBKWIC) katarası basma (aksiyal) özellikleri az bir değerde nh-B4C katkılı p-aramid kompozite göre daha yüksek olmakla birlikte atkı yönlerindeki özellikleri birbirlerine genel olarak benzerlik göstermiştir. Burdan elde edilen sonuçlar

kalın plakaların katarası basma (aksiyal) özelliklerinin matriks özelliklerine bağlı olmakla birlikte nh-B₄C/epoksi matrisin katkısız epoksiye göre çözgü yönünde hafiften bir düşük değer olarak elde edilmesine karşın, atkı yönü dayanımında çok az bir iyileşme (%1,51) sağladığı tespit edilmiştir.

Burada bir başka noktada deney örneklerinin hazırlanmasında tornalama gibi mekanik işlemlerin para-aramid balistik plakalara uygulanması, muhemel mikro seviyede yan etkilere yol açtığı düşünülmüştür. Bunun için bu tür yapılar üzerine mekanik işlemler (tornalama, frezeleme, delme, kesme vb.) ile ilgili de yenilikçi çalışmalara gereksinim olduğu ileri sürülmüştür.

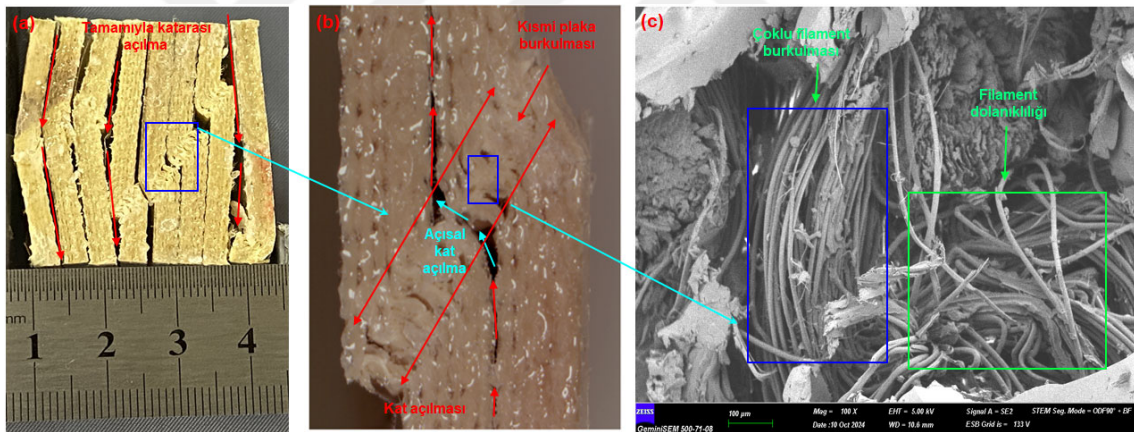


Şekil 4.19. Para-aramid/epoksi/nh-B₄C nano kompozitlerin çözgü ve atkı kesiti boyunca (aksiyal) katarası basma sonuçları. (a) Çözgü-atkı boyunca katarası basma dayanımı(N), (b) Çözgü-atkı boyunca katarası basma gerilimi(MPa), (c) Çözgü-atkı boyunca katarası basma uzaması(%), (d) Çözgü-atkı boyunca katarası basma modülü(GPa).

4.1.6.2. Katarası basma (aksiyal) bozunma modu

Şekil 4.20(a-c)'de para-aramid/epoksi kompozitlerde çözgü yönü (NBKWIC) katarası basma (aksiyal) bozunma modları optik ve FESEM görüntüleri olarak verilmiştir.

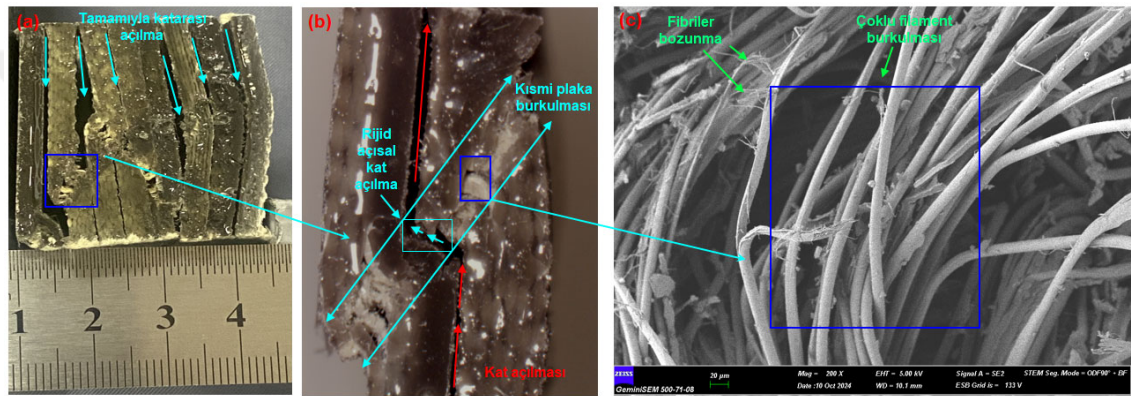
Şekil 4.20(a-c)' den görüleceği üzere sekiz katmanlı yapının birbirlerine epoksi matriksi ile birleştiği ve basma yükünün çözgü yönünde uygulanması ile katmanlar arasında tamamıyla kat açılması (Şekil 4.20a) ve kısmi kayma bandında plaka burkulması (Şekil 4.20b) ve açılal lif burkulması (kinking) elde edilmiştir. En dış katman burkulmasının dış bükey geometride ve basma alanında kısmi ezilme ile kendisini gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca, basma yönüne dik çözgü filament demetinde burkulma, matriks kırılması ve az sayıda kısmi filament kırılması daha çok tok bir davranış (Şekil 3.15b) ile kendisini göstermiştir. Bir başka noktada filament dolanıklığının (Şekil 4.20c) ortaya çıkması muhtemelen çözgü-atkı kesişme bölgesindeki şekil değişimi ile gerçekleştiği ileri sürülebilir. Ancak bu bozunmaların dramatik filament demet kırılması şeklinden ziyade matriks bozunmaları ile kendisini göstermesidir.



Şekil 4.20. Para-aramid/epoksi kompozitlerde (NBKWIC) katarası basma (aksiyal) bozunma modları. (a) NBKWIC yapıda katarası açılma ve bölgesel plaka burkulması (Dijital foto), (b) NBKWIC yapıda katarası açılma ve lokal plaka burkulmanın kumaş katmanı üzerinde görünümü (Optik mikroskop x6.7) ve (c) Kumaş katmanındaki çözgü ipliği ve filamentlerin burkulması (FESEM x100).

Şekil 4.21(a-c)'de nh-B₄C katkılı para-aramid/epoksi kompozitlerde çözgü yönü (NBBWIC) katarası basma (aksiyal) bozunma modları optik ve FESEM görüntüleri olarak verilmiştir. Şekil 4.21(a-c)' den görüleceği üzere sekiz katmanlı yapının birbirlerine nh-B₄C/epoksi matriksi ile birleştiği ve basma yükünün çözgü yönünde uygulanması ile katmanlar arasında tamamıyla kat açılması (Şekil 4.21a) ve kısmi kayma bandında plaka burkulması (Şekil 4.20b) ve rijid açılal lif burkulması (kinking) elde edilmiştir. En dış katman burkulmasının dış bükey geometride ve basma alanında kısmi

ezilme ile kendisini gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca, basma yönüne dik çözgü filament demetinde burkulma, matriks kırılması ve az sayıda kısmi fibriller filament bozunması bariz kırılğan bir davranış (Şekil 3.15d) ile kendisini göstermiştir. Ayrıca, filament demetlerinin açılması (Şekil 4.21c) muhtemelen basma yükü altında çözgü-atkı kesişme bölgesindeki şekil değişimi ile gerçekleştiği ileri sürülebilir. Ancak, bu bozunmaların dramatik filament demet kırılmasından ziyade matriks bozunmaları ile kendisini göstermesidir.



Şekil 4.21. Para-aramid/epoksi nano kompozitlerde (NBBWIC) katarası basma (aksiyal) bozunma modları. (a) NBBWIC yapıda katarası açılma ve bölgesel plaka burkulması (Dijital foto), (b) NBBWIC yapıda katarası açılma ve bölgesel plaka burkulmanın kumaş katmanını üzerindeki görünümü (Optik mikroskop x6.7) ve (c) Kumaş katmanındaki çözgü ipliği ve filamentlerin burkulması ve bozunması (FESEM x200).

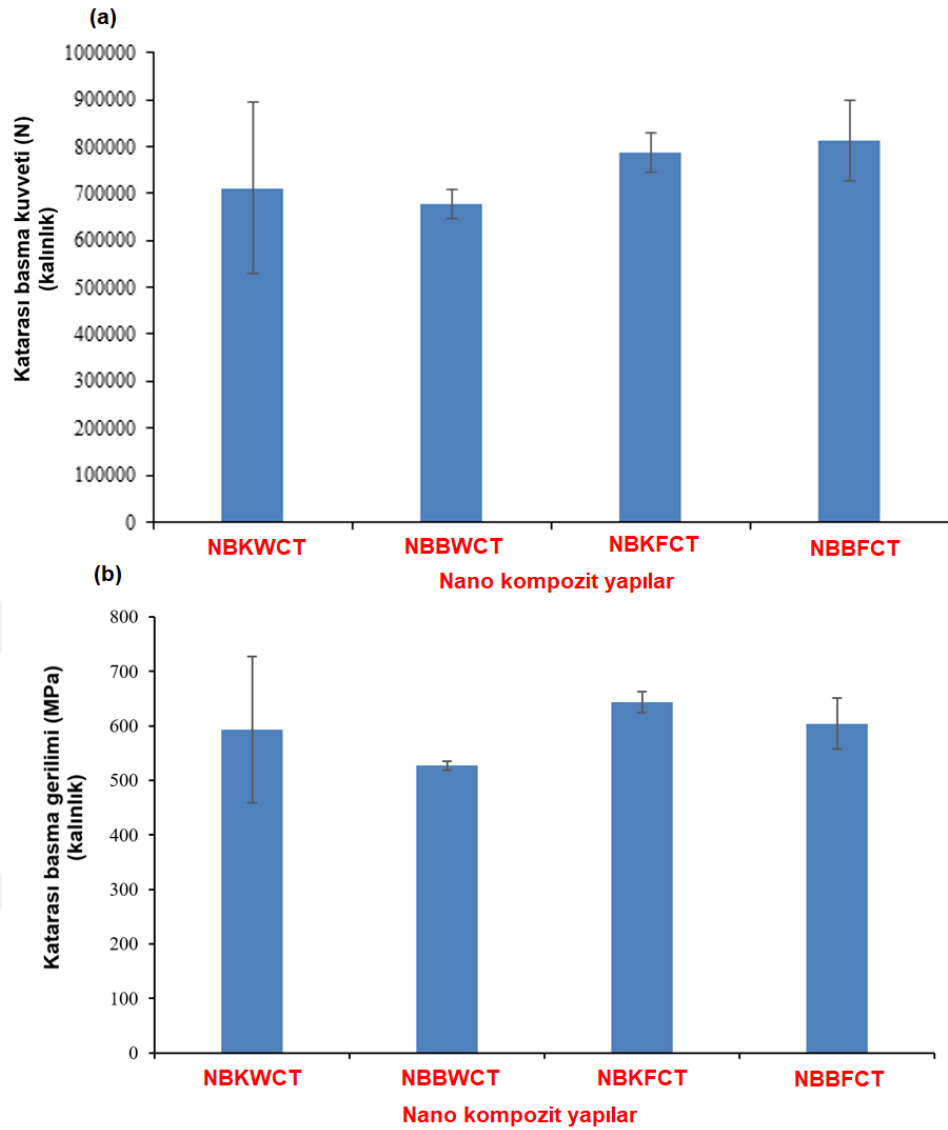
4.1.7. Para-aramid/epoksi nano kompozit katarası basma (kalınlık) sonuçları

4.1.7.1. Katarası basma(kalınlık) dayanım sonuçları

Şekil 4.22(a-b), para-aramid/epoksi/nh-B₄C nano kompozitlerin çözgü ve atkı düzleminde (kalınlık) katarası basma sonuçlarını göstermektedir.

Şekil 4.19(b) deki sonuçlardan görüleceği üzere, kontrol kompozitlerin çözgü yönü (NBKWCT) katarası basma (kalınlık) dayanımı %8,37 oranında atkı yönüne (NBKFCT) göre daha düşük çıkmıştır. Öte yandan nano borkarbür p-aramid kompozitin çözgü yönü (NBBWCT) katarası basma (kalınlık) dayanım değeri %14,58 atkı yönüne (NBBFCT) göre düşük çıktığı ayrıca tespit edilmiştir. Yine, kontrol kompozitin çözgü ve atkı yönü (NBKWCT) katarası basma (kalınlık) gerilme özellikleri sırası ile %11,13 ve %6,04 oranında nh-B₄C katkılı p-aramid kompozite göre daha yüksek çıkmıştır.

Buradan elde edilen sonuçlar kalın plakaların katarası basma (kalınlık) özelliklerinin para-aramid lif ve matriks özelliklerine bağılı olmakla birlikte nh-B₄C eklemesinin önemli bir katkısının olmadığı tespit edilmiştir. Bunun muhtemel nedeni basma yükünün merkeze yakın bölgede nh-B₄C/matris üzerinde katarası kayma direncini etkileyerek, katmanların düzlem dışına doğru kaymasını sağlaması ve bunun sonucu olarak katmanın yapıdan dışarıya doğru kayarak çıkması esaslı şekil değişimi olarak tespit edilmiştir. Bu olay test esnasında kendisini göstererek, katman ana plaka yapısından dışarıya doğru düşük hızda hareket etmiştir. Ancak, kalınlık yönünde elde edilen statik basma değeri sıradışı bir değer olarak kendisini göstererek balistik (dinamik) yüklemeler hakkında da birtakım açıklayıcı bilgilerin ortaya çıkmasına yol açması açısından kritik değerler olarak göz önüne alınmıştır. Dolayısı ile nano ve kontrol balistik plakalardan elde edilen statik basma sonuçları ileride yürütülecek daha karmaşık dinamik yüklemeler için aydınlatıcı bilgiler içermesi nedeni ile önemli bulunmuştur.



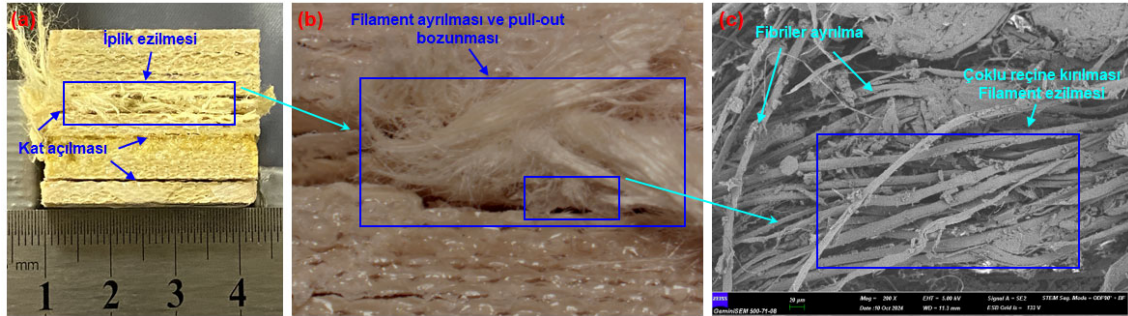
Şekil 4.22. Para-aramid/epoksi/nh-B₄C nano kompozitlerin çözgü ve atkı düzleminde (kalınlık) katarası basma sonuçları. (a) Çözgü-atkı düzleminde katarası basma dayanımı(N), (b) Çözgü-atkı düzleminde katarası basma gerilimi(MPa).

4.1.7.2. Katarası basma (kalınlık) bozunma modu

Şekil 4.23(a-c), para-aramid/epoksi kompozitlerde (NBKWCT) katarası basma (kalınlık) bozunma modları optik ve FESEM görüntüleri olarak verilmiştir.

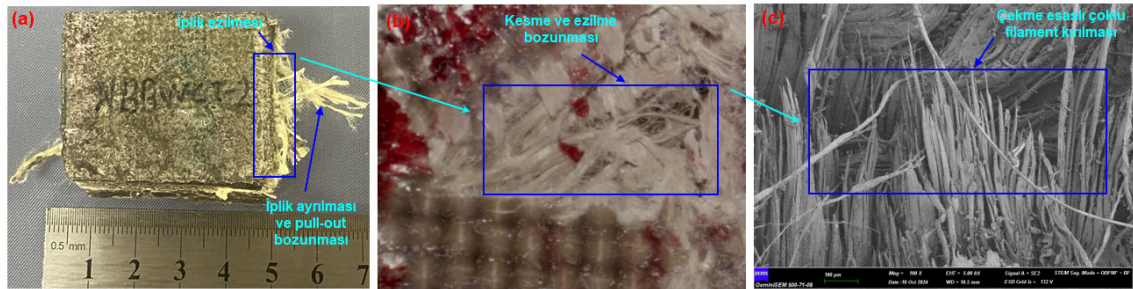
Şekil 4.23'den görüleceği üzere bozunma modları kendisini katarası açılma (delamination) ve iplik yapısında çoklu filament ezilmesi (yarn crushing) olarak göstermiştir (Şekil 4.23a). Optik mikroskop görüntülerinden filamentlerin demet olarak ayrılması (splitting) ve pull-out bozunması olarak tespit edilmiştir. Daha yakından

FESEM görüntülerinden bakıldığında tamamı ile matriks kırılması, matris-lif ayrılması, filament ezilmesi ve dolaylı olarak çekme esaslı bozunmalar olarak kendisini göstermiştir (Şekil 4.23c).



Şekil 4.23. Para-aramid/epoksi kompozitlerde (NBKWCT) katarası basma (kalınlık) bozunma modları. (a) NBKWCT yapıda katarası açılma ve lokal plaka bozunması (dijital foto), (b) NBKWCT yapıda katarası açılma ve lokal matris-lif bozunma görünümü (optik mikroskop x6.7) ve (c) Kumaş katmanındaki çözgü ipliği ve filamentlerde çoklu matris ve filament kırılmaları (FESEM x200).

Şekil 4.24(a-c), nh-B₄C para-aramid/epoksi kompozitlerde (NBBWCT) katarası basma (kalınlık) bozunma modları optik ve FESEM görüntüleri olarak verilmiştir. Şekil 4.24'den görüleceği üzere bozunma modları kendisini katarası açılma (delamination) ve iplik yapısında çoklu filament ezilmesi (yarn crushing) ve ayrılması olarak göstermiştir (Şekil 4.24a). Optik mikroskop görüntülerinden filamentlerin demet olarak ayrılması (splitting), kesme (kayma) ve pull-out bozunması olarak tespit edilmiştir. Daha yakından FESEM görüntülerinden bakıldığında tamamı ile matriks kırılması, matris-lif ayrılması, filament ezilmesi ve dolaylı olarak çekme esaslı çoklu filament ve iplik kırılmaları esaslı bozunmalar olarak kendisini göstermiştir (Şekil 4.24c). Ayrıca, hem nano bor karbür eklemeli ve hem de kontrol plaka örneklerindeki kalınlık yönünde, basma esaslı bozunmaların yapının orta katmanlarında gerçekleşmesi muhtemelen kalınlık yönünde liflerin bulunmaması nedeni ile yüklerin her bir lamina düzleminde (in-plane) ki liflerin yükü taşıma sonrası bir sonraki katarası matriks düzleme (out-of-plane) ve buradan yine lif düzlemine ve sonra katarası matriks düzleme aktarılması esaslı bir mekanizma ile ilişkili olduğu şeklinde yorumlanmıştır. Özellikle nano bor karbür eklemeli yapıda basma yükünün katarası matriks düzleme aktarılması sonrası, burada katmanların kayma esaslı yerdeğiştirmesi nedeni ile yanal yönde dışarıya doğru hareketi de kompleks yapışma-tutunma (adhesion-slip) etkileri olarak değerlendirilmiştir.



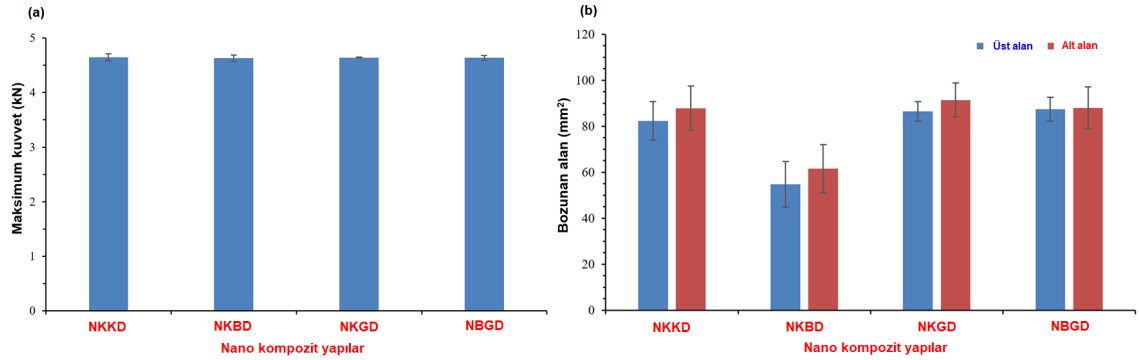
Şekil 4.24. Para-aramid/epoksi nano kompozitlerde (NBBWCT) katarası basma (kalınlık) bozunma modları. (a) NBBWCT yapıda katarası açılma ve lokal plaka bozunması (dijital foto), (b) NBBWCT yapıda katarası açılma ve lokal matris-lif bozunma görünümü (optik mikroskop x6.7) ve (c) Kumaş katmanındaki çözgü ipliği ve filamentlerde çoklu çekme esaslı filament kırılmaları (FESEM x200).

4.1.8. Para-aramid/epoksi nano kompozit ağırlık düşürme (Drop-Weight) sonuçları

4.1.8.1. Ağırlık düşürme maksimum kuvvet ve bozunma alanı sonuçları

Şekil 4.25(a-b)'de para-aramid/epoksi nano kompozitlerde ağırlık düşürme yüklemesi sonucu maksimum kuvvet (kN) ve bozunan alan (mm^2) sonuçları grafik formunda verilmiştir.

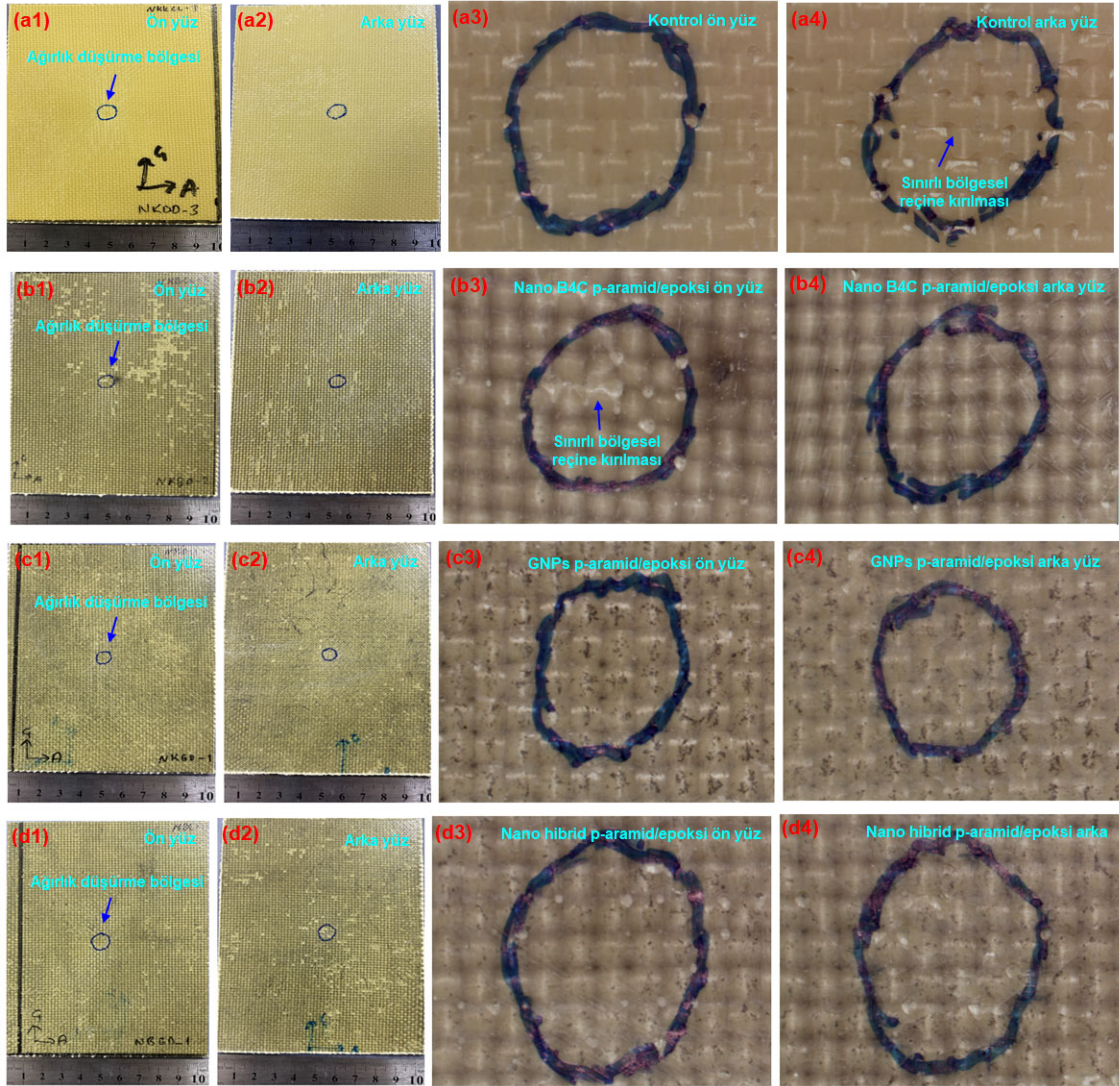
Şekil 4.25'den görüleceği üzere p-aramid/epoksi (NKKD), nano borkarbür katkılı (NKBD), GNPs katkılı ve hibrit kompozitlerin düşürme yükü atındaki maksimum kuvvet değerleri 4,63-4,65 (kN) aralığında değişim göstererek kompozitler arasında önemli bir farklılığa rastlanmamakla birlikte, nh-B₄C katkılı p-aramid kompozitin bozunma alanının diğerlerine kıyasal daha düşük çıktığı tespit edilmiştir (Şekil 4.25b). Bunun nedeni muhtemelen nano bor karbürün düşük hızda dinamik basma özelliklerini para-aramid/epoksi yapıya aktararak bozunma alanını dar bir alanda hapsetmesi olarak yorumlanmıştır.



Şekil 4.25. (a) Para-aramid/epoksi nano kompozitlerde ağırlık düşürme yüklemesi sonucu maksimum kuvvet(kN) ve (b) Bozunan alan(mm²) sonuçları.

4.1.8.2. Ağırlık düşürme bozunma modu

Şekil 4.26(a1-d4), para-aramid/epoksi nano kompozitlerde ağırlık düşürme yüklemesi sonucu bozunan alan (mm²) sonuçlarını optik mikroskop görüntüleri üzerinden göstermektedir. Şekil 4.26'dan görüleceği üzere, bütün kompozit örneklerde matriks ya da nano/matriks bozunmaları özellikle yapının arka yüzeylerinde mezo-mikro seviyede gerçekleşmiştir. Muhtemelen mikro matriks/filament ya da nano/matriks arayüzeylerde gizli bozunmaların olduğu ileri sürülebilir. Kontrol kompozit de sınırlı matriks bozunması (a3-a4), nh-B₄C katkılı kompozitin üst yüzeyinde düşük değerde az sayıda matriks kırılması (b3-b4), GNPs katkılı ve hibrit kompozitler de ise makro düzeyde önemli lif kırılmaları esaslı bir bozunma gerçekleşmemesine karşın yine düşük düzeyde matriks kırılmaları olarak kendisini gösterdiği tespit edilmiştir (c3-c4, d3-d4).



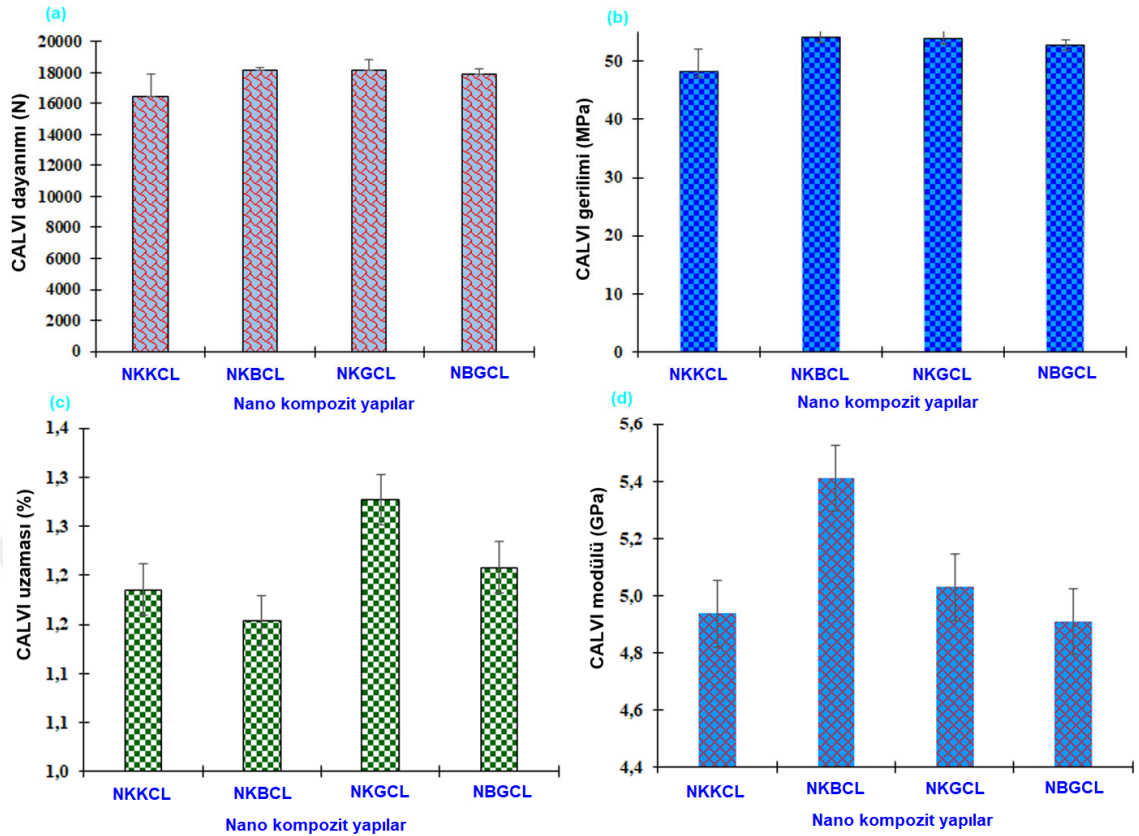
Şekil 4.26. Para-aramid/epoksi nano kompozitlerde ağırlık düşürme yüklemesi sonucu bozulan alan(mm^2) sonuçları. (a1 ve a2) Para-aramid/epoksi kompozit sırası ile bozulan ön yüz ve arka yüz(dijital foto), (a3 ve a4) Büyütülmüş sırası ile bozulan ön ve arka yüz(optik mikroskop x6.7), (b1 ve b2) Para-aramid/epoksi nano bor karbür(B₄C) kompozit sırası ile bozulan ön yüz ve arka yüz(dijital foto), (b3 ve b4) Büyütülmüş sırası ile bozulan ön ve arka yüz(optik mikroskop x6.7), (c1 ve c2) Para-aramid/epoksi grafan nano plaka(GNPs) kompozit sırası ile bozulan ön yüz ve arka yüz(dijital foto), (c3 ve c4) Büyütülmüş sırası ile bozulan ön ve arka yüz(optik mikroskop x6.7), (d1 ve d2) Para-aramid/epoksi hibrit nano bor karbür(B₄C)/grafan nano plaka(GNPs) kompozit sırası ile bozulan ön yüz ve arka yüz(dijital foto) ve (d3 ve d4) Büyütülmüş sırası ile bozulan ön ve arka yüz(optik mikroskop x6.7).

4.1.9. Para-aramid/epoksi nano kompozit ağırlık düşürme sonrası basma (CALVI) sonuçları

4.1.9.1. CALVI dayanım, gerilme(MPa)-uzama(%) ve modül sonuçları

Şekil 4.27(a-d)'de para-aramid/epoksi nano kompozitlerde ağırlık düşürme sonrası basma (CALVI) sonuçları grafik formunda verilmiştir. Şekil 4.27'den görüleceği üzere nano borkarbür katkılı p-aramid/epoksi kompozitin (NKBCL) gerilme dayanımı, GNPs katkılı (NKGCL), hibrit (NBGCL) ve kontrol (NKKCL) kompozitlere göre sırası ile %0,35, %2,49 ve %10,73 olarak önemsiz oranlarda daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir. Benzer iyileşme kendisini CALVI modül değerlerinde de göstermiştir.

Ayrıca, NKBCL nin uzama (%) değeri GNPs katkılı (NKGCL), hibrit (NBGCL) ve kontrol (NKKCL) kompozitlere göre sırası ile %11,30, %5,22 ve %3,48 olarak daha düşük çıkarak daha rijid bir performans göstermiştir. Bu verilerden hareketle nano bor karbürün p-aramid/epoksi yapıya katılması kompozitin özellikle havacılık için önemli bir parametre olan vurmada sonra basma (CAI) performansının belirgin olarak iyileştirdiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.27. Para-aramid/epoksi nano kompozitlerde ağırlık düşürme sonrası basma (CALVI) sonuçları. (a) CALVI basma dayanımı(N), (b) CALVI basma gerilimi (MPa), (c) CALVI basma uzaması (%) ve (d) CALVI basma modülü (GPa)

4.1.9.2. CALVI bozunma modu sonuçları

Şekil 4.28(a1-d4)'de para-aramid/epoksi nano kompozitlerde ağırlık düşürme yüklemesi sonrası basma bozunma modları dijital, optik mikroskop ve FESEM görüntüleri üzerinden elde edilmiştir.

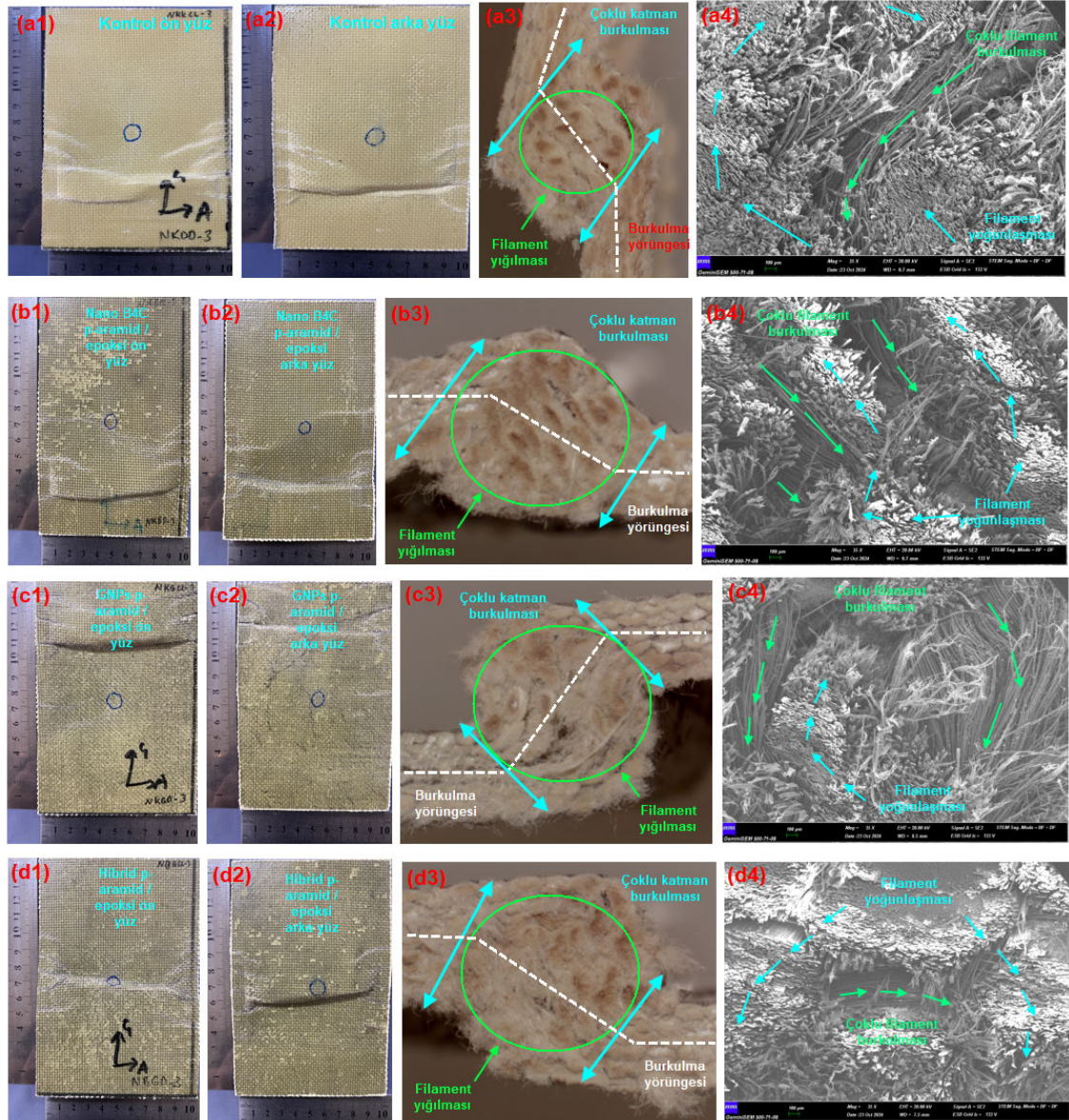
Şekil 4.28'den anlaşılabileceği üzere, CALVI yükü altında nh-B₄C katkılı NKBCL yapıda çoklu katman burkulması, bunun sonucu bölgesel malzeme şişmesi (swelling) ve çoklu ipliklerdeki filament yığılması gerçekleşmiştir (Şekil 4.28b3). Çoklu katman burkulmasının gerçekleştiği bölgeye daha yakından bakıldığında çoklu çözgü filament burkulması ve atkı ipliği içindeki filamentlerin göçerek (fiber migration) daha sıkı düzende bir araya gelerek yoğunlaşması gerçekleşmiştir (Şekil 4.28b4).

GNPs katkılı NKGCL yapıda ise benzer şekilde çoklu katman burkulması, bunun sonucunda yapıda hatırı sayılır şişme ve atkı filamentlerinde yığılma ve burkulma yörüngesine paralel katman açılması (delamination) elde edilmiştir (Şekil 4.28c3). Çoklu

katman burkulmasının olduğu bölgeye daha yakından bakıldığında, özellikle çözgülerde çoklu filament burkulması ve atkı ipliği içindeki filamentlerin daha sıkı düzende bir araya gelerek (fiber migration) yoğunlaşması gerçekleşmiştir (Şekil 4.28c4).

Hibrit (nh-B₄C ve GNPs) katkılı NBGCL yapısında ise nano bor karbür katkılı yapısına daha yakın şekil değişimleri kendisini çoklu katman burkulması, atkı filament yığılması (Şekil 4.28d3) ve daha yakından bozunma bölgesine bakıldığında, çözgülerde çoklu filament burkulması ve atkı filament yoğunlaşması olarak kendisini göstermiştir (Şekil 4.28d4).

Öte yandan kontrol NKKCL kompozite bakıldığında, bozulmanın çoklu katman burkulması, bunun sonucunda yapıda önemli ölçekte şişme ve atkı filamentlerinde yığılma ve burkulma yörüngesine paralel kısmi katman açılması (delamination) gerçekleşmiştir (Şekil 4.28a3). Çoklu katman burkulması bölgesine daha yakından bakıldığında özellikle çözgülerde çoklu filament burkulması ve iplik içindeki filamentlerin daha sıkı düzende bir araya gelerek yoğunlaşması gerçekleşmiştir (Şekil 4.28a4). Çoklu katman burkulmasında aslında matris/lif arayüzeylerinde soyulma ve kırılma, filamentler arası matris kırılması neticesinde mikro boşluklar ve mezo seviyede düzensiz bir yapıya dönüşme gerçekleşmektedir.



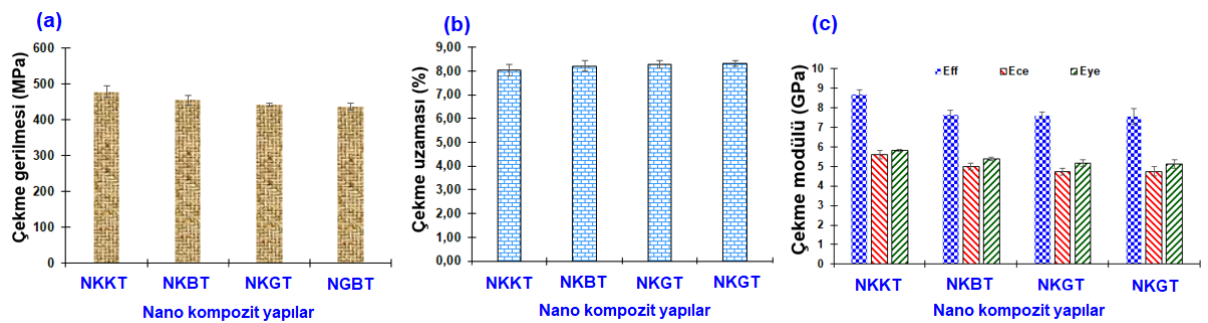
Şekil 4.28. Para-aramid/epoksi nano kompozitlerde ağırlık düşürme yüklemesi sonrası basma bozunma modları. (a1 ve a2) Para-aramid/epoksi kompozit sırası ile bozulan ön yüz ve arka yüz(dijital foto), (a3 ve a4) Büyütülmüş sırası ile bozulan çözgü yönü kesit (optik mikroskop x6.7, FESEM x35), (b1 ve b2) Para-aramid/epoksi nano bor karbür(B4C) kompozit sırası ile bozulan ön yüz ve arka yüz(dijital foto), (b3 ve b4) Büyütülmüş sırası ile bozulan çözgü yönü kesit (optik mikroskop x6.7, FESEM x35), (c1 ve c2) Para-aramid/epoksi grafan nano plaka(GNP's) kompozit sırası ile bozulan ön yüz ve arka yüz(dijital foto), (c3 ve c4) Büyütülmüş sırası ile bozulan çözgü yönü kesit(optik mikroskop x6.7, FESEM x35), (d1 ve d2) Para-aramid/epoksi hibrit nano bor karbür(B4C)/grafan nano plaka(GNP's) kompozit sırası ile bozulan ön yüz ve arka yüz(dijital foto) ve (d3 ve d4) Büyütülmüş sırası ile bozulan çözgü yönü kesit(optik mikroskop x6.7, FESEM x35).

4.1.10. Para-aramid/epoksi nano kompozit statik çekme sonuçları

4.1.10.1. Çekme gerilme(MPa)-uzama(%) ve modül sonuçları

Şekil 4.29(a-c)'de para-aramid/epoksi nano kompozitlerde statik çekme sonuçları çekme gerilmesi (MPa), çekme uzaması (%) ve çekme modül değerleri (GPa) üzerinden verilmiştir.

Şekil 4.29'dan görüleceği üzere nano borkarbür katkılı p-aramid/epoksi kompozitin (NKBT) çekme gerilme dayanımı GNP's katkılı (NKGT) ve hibrit (NBGT) kompozitlere göre sırası ile %2,78 ve %4,00 olarak önemsiz oranlarda daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir. Ancak, NKBT nin çekme gerilme dayanımı kontrol (NKKT) kompozite göre %5,14 oranında daha düşük performans gösterdiği tespit edilmiştir. Öte yandan, elastik bölgedeki (E_{ff}) çekme modül değerleri 7,57-8,71 GPa aralığında elde edilmiştir. Kontrol NKKT yapısının çekme modül değeri de nano katkılı kompozitlerin ortalama değerleri ile kıyaslandığında %12,63 daha iyi sonuç göstermiştir. Nano kompozitlerin çekme uzama değerleri %8,33-8,04 aralığında elde edilmiştir. Nano kompozitlerin ortalama uzama değerini kontrol la kıyasladığımızda %2,78 lik bir yükseliş tespit edilmiştir. Bunun muhtemel nedeni özellikle GNP's katkılı kompozitlerde GNP's nin soft balistiklerin pull-out özelliklerinde olduğu gibi sanki yapıda yağlayıcı bir etki oluşturmasından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır.

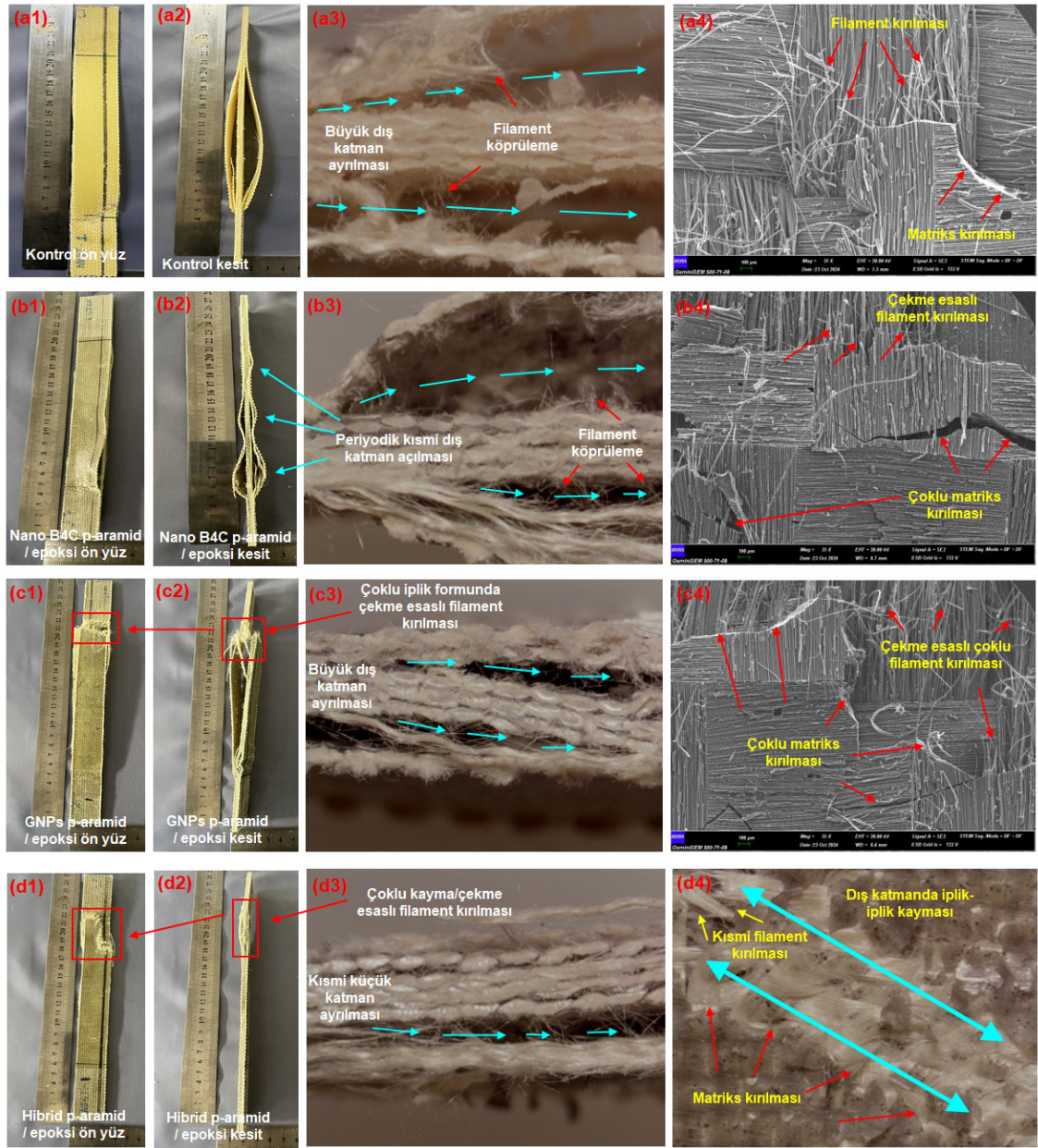


Şekil 4.29. Para-aramid/epoksi nano kompozitlerde statik çekme sonuçları. (a) Çekme gerilmesi (MPa), (b) Çekme uzaması (%) ve (c) Çekme modül değerleri (GPa)

4.1.10.2. Çekme bozunma modu sonuçları

Şekil 4.30(a1-d4)'de para-aramid/epoksi nano kompozitlerde statik çekme sonrası bozunma modları optik mikroskop ve FESEM görüntüleri üzerinden verilmiştir. Şekil 4.30' den görüleceği üzere, kontrol (NKKT) yapısında çekme yükü altında özellikle dış

katmanlarda çok büyük katarası açılma (delamination) gerçekleşerek, bunun bütün yapı en ve boyunca ilerlediği belirlenmiştir (Şekil 4.30a2). Ayrılma esaslı bozunma bölgesine yakından bakıldığında, ayrılan dış katmanlar arasında filamentlerin köprüleme yaptığı tespit edilmiştir (Şekil 4.30a3). Ayrıca, bozunma yüzeyi yakından irdelendiğinde çoklu bölgesel matriks kırılmaları ve filament kırılmalarının gerçekleştiği anlaşılmıştır (Şekil 4.30a4). Nano borkarbür eklemeli (NKBT) yapının bozunma modu incelendiğinde ise, periyodik kısmi dış katman açılmasının gerçekleştiği tespit edilirken (Şekil 4.30b2), ayrılan dış katmanlarda çoklu nano bor karbür/filament köprülemelerinin olduğu anlaşılmıştır (Şekil 4.30b3). Ayrıca, NKBT yapısındaki katarası açılmanın NKKT' ye göre daha küçük ve bölgesel olduğu, dolayısı ile bozunmanın yıkıcı (catastrophic failure) olmadığı sonucuna varılmıştır. Bozunma yüzeylerinde ise çekme esaslı çoklu filament kırılması ve matriks kırılmaları elde edilmiştir (Şekil 4.30b4). GNPs eklemeli (NKG) yapıda ise, toplam çekme esaslı ayrılma, örneğin çenenin tutulma bölgesine yakın yerden gerçekleşmiştir (Şekil 4.30c1,c2). Ek olarak, dış katman boyunca tamamı ile ayrılma ve ayrılma ilerleyişi tespit edilmiştir. Katman açılma bölgesi yakından irdelendiğinde, büyük dış katman ayrılması ve çözgü boyunca ayrılma ilerlemesi belirlenmiştir (delamination propagation) (Şekil 4.30c3). Bozunma yüzeylerinde ise çekme esaslı çoklu filament kırılması ve matriks kırılmaları elde edilmiştir (Şekil 4.30c4). Hibrid (nh-B4C ve GNPs) nano eklemeli (NBGT) yapının ise çekme yükü altında bozunmanın, kompozitin yüzeyinde açılma değişimin (shear) matriks/filament kırılması ve sınırlı bölgede kat açılması olarak ilerlemesi şeklinde gerçekleştiği anlaşılmıştır (Şekil 4.30d1,d2). Bozunma bölgesi daha yakından incelendiğinde ise yine dış katmanın açılma modu ve nano karışım/filament köprülemesi şeklinde açılmanın ilerlediği tespit edilmiştir (Şekil 4.30d3). Bozunma yüzeylerinde ise iplik-iplik kayması, nano/matriks kırılması ve kısmi çoklu filament kırılmaları elde edilmiştir (Şekil 4.30d4). Nano kompozitlerin çekme yükü altında bozunma modlarından anlaşılabileceği üzere nano bor karbürün eklenmesinin yapının hasar toleransını iyileştirdiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.30. Para-aramid/epoksi nano kompozitlerde statik çekme sonrası bozunma modları. (a1 ve a2) Para-aramid/epoksi kompozit sırası ile bozulan ön yüz ve çözgü boyu kesit(dijital foto), (a3 ve a4) Büyütülmüş sırası ile bozulan çözgü yönü kesit ve ön yüz (optik mikroskop x6.7, FESEM x35), (b1 ve b2) Para-aramid/epoksi nano bor karbür(B4C) kompozit sırası ile bozulan ön yüz ve çözgü boyu kesit(dijital foto), (b3 ve b4) Büyütülmüş sırası ile bozulan çözgü yönü kesit ve ön yüz (optik mikroskop x6.7, FESEM x35), (c1 ve c2) Para-aramid/epoksi grafan nano plaka(GNPs) kompozit sırası ile bozulan ön yüz ve çözgü yönü kesit(dijital foto), (c3 ve c4) Büyütülmüş sırası ile bozulan çözgü yönü kesit ve ön yüz(optik mikroskop x6.7, FESEM x35), (d1 ve d2) Para-aramid/epoksi hibrit nano bor karbür(B4C)/grafan nano plaka(GNPs) kompozit sırası ile bozulan ön yüz ve çözgü yönü kesit(dijital foto) ve (d3 ve d4) Büyütülmüş sırası ile bozulan çözgü yönü kesit ve ön yüz(optik mikroskop x6.7).

4.1.11. Para-aramid/epoksi nano kompozit statik basma sonuçları

4.1.11.1. Basma gerilme(MPa)-uzama(%) ve modül sonuçları

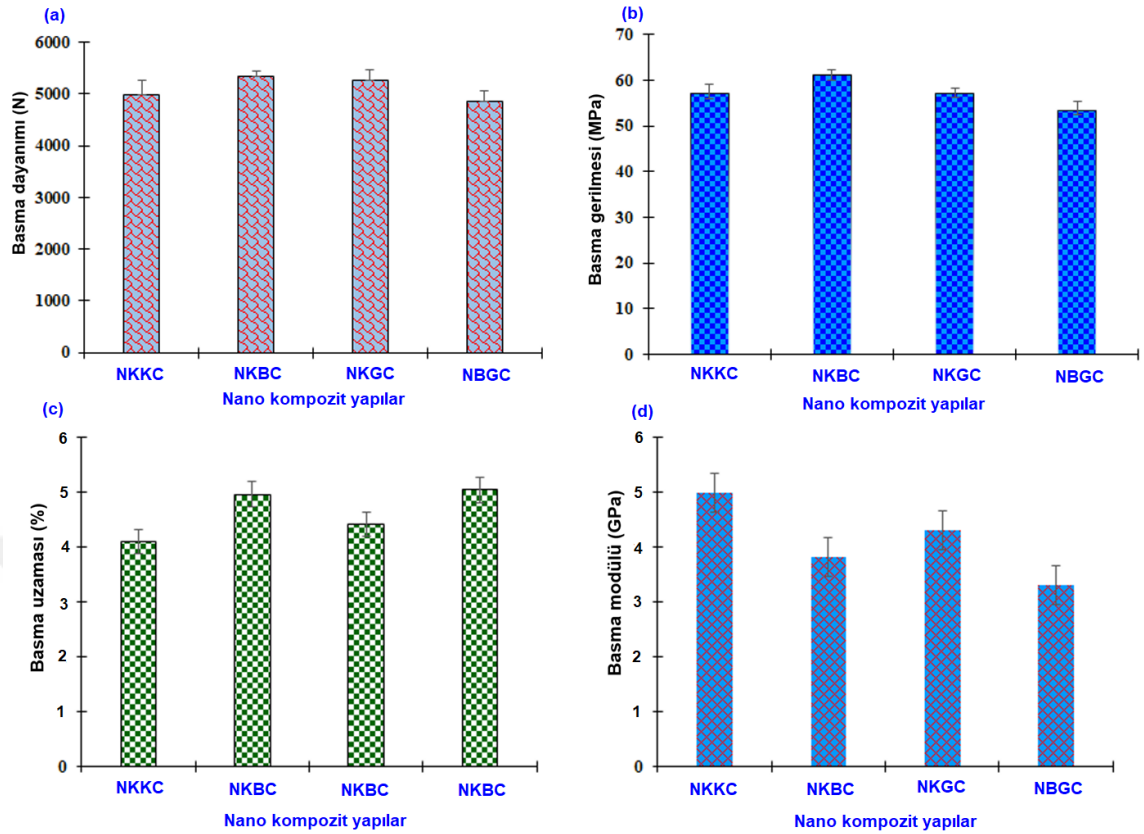
Şekil 4.31(a-d)'de para-aramid/epoksi nano kompozitlerde statik basma sonuçları basma gerilmesi(MPa), basma uzaması(%) ve basma modül değerleri(GPa) üzerinden verilmiştir.

Şekil 4.31'den görüleceği üzere nano borkarbür katkılı p-aramid/epoksi kompozitin (NKBT) basma gerilme dayanımı GNP's katkılı (NKG'T), hibrit (NBGT) ve kontrol (NKKC) kompozitlere göre sırası ile %6,37, %12,56 ve %6,54 olarak belirli oranlarda daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir.

Öte yandan, elastik bölgedeki basma modül değerleri 1,65-2,49 GPa aralığında elde edilmiştir. Kontrol NKK'T yapısının çekme modül değeri de nano katkılı kompozitlerin ortalama değerleri ile kıyaslandığında %23,69 daha iyi sonuç göstermiştir. Bu değerin matriks esaslı özelliklere bağlı olduğu şekilde yorumlanmıştır.

Nano kompozitlerin basma uzama (kısılma) değerleri %2,05-2,52 aralığında elde edilmiştir. Nano kompozitlerin ortalama uzama değerini kontrol la kıyasladığımızda %14,94 lik bir yükseliş tespit edilmiştir.

Bunun muhtemel nedeni özellikle nh-B4C ve GNP's katkılı kompozitlerde nano-matriks arayüzeylerinde olası kayma esaslı ekstra düzlem içi (in-plane) ve düzlem dışı (out-of-plane) yer değiştirmelerle ilgili olabileceği sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.31. Para-aramid/epoksi nano kompozitlerde statik basma sonuçları. (a) Basma dayanımı(N), (b) Basma gerilmesi(MPa), (c) Basma uzaması(%) ve (d) Basma modül değerleri(GPa)

4.1.11.2. Basma bozunma modu sonuçları

Şekil 4.32(a1-d4)'de para-aramid/epoksi nano kompozitlerde statik basma sonrası bozunma modları optik mikroskop ve FESEM görüntüleri üzerinden verilmiştir.

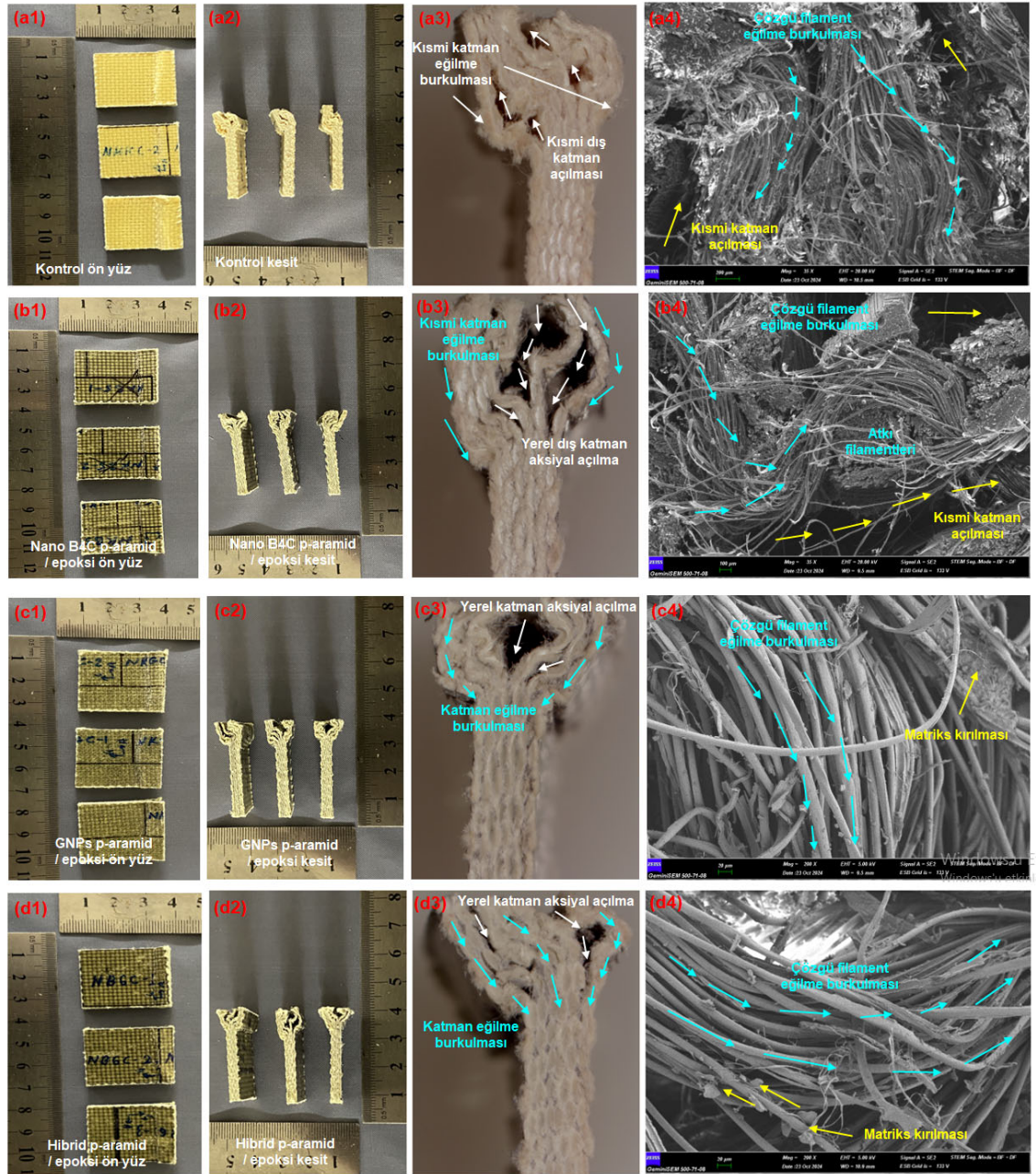
Şekil 4.32' den görüleceği üzere, kontrol (NKKT) yapısında basma yükü altında kısmi katman eğilme burkulması (flexural kinking) ve özellikle dış katmanlarda büyük katarası açılma (delamination) gerçekleşerek bunun bütün yapının eni ve boyunca ilerlediği belirlenmiştir (Şekil 4.32a2). Ayrılma esaslı bozunma bölgesine yakından bakıldığında ise orta katmanlarda ayrılma esaslı çatlak ilerlemesi (delamination crack propagations) tespit edilmiştir (Şekil 4.32a3). Ayrıca, bozunma kesiti yakından irdelendiğinde çoklu bölgesel matriks kırılmaları ve kısmi filament kırılmaları ve çözgü filamentlerinde eğilme burkulmasının gerçekleştiği anlaşılmıştır (Şekil 4.30a4).

Nano borkarbür eklemeli (NKBT) yapının basma bozunma modu incelendiğinde ise, kısmi katman eğilme burkulması (flexural kinking) ve özellikle tek yönlü dış katmanlarda büyük katarası açılma (delamination) gerçekleşerek bunun bütün yapının eni ve boyunca ilerlediği belirlenmiştir (Şekil 4.32b2). Ayrılma esaslı bozunma bölgesine yakından bakıldığında ise orta katmanlarda ayrılma esaslı çatlak ilerlemesi (delamination crack propagations) tespit edilmiştir (Şekil 4.32b3). Ayrıca, bozunma kesiti yakından irdelendiğinde, çoklu bölgesel matriks kırılmaları, kısmi filament kırılmaları, çözgü filamentlerinde eğilme burkulması ve atkı filament demetlerinde kısmi açılmaların gerçekleştiği anlaşılmıştır (Şekil 4.30b4).

GNPs eklemeli (NKG T) yapıda ise, benzer olarak yapının orta kesimindeki katmanlar arasında kısmi katman eğilme burkulması (flexural kinking) ve büyük katarası açılma (delamination) gerçekleşerek bunun bütün yapının eni ve boyunca ilerlediği belirlenmiştir (Şekil 4.32c2,c3). Ayrıca, bozunma kesiti yakından irdelendiğinde çoklu bölgesel matriks kırılmaları, kısmi filament kırılmaları, çözgü filamentlerinde eğilme burkulması gerçekleştiği anlaşılmıştır (Şekil 4.32c4).

Hibrid (nh-B₄C ve GNPs) nano eklemeli (NBGT) yapının ise basma yükü altında bozunmanın, kompozitin kesitinde çoklu açılma eğilme burkulması (angular flexural kinking) ve sınırlı bölgede çoklu kat açılması olarak ilerlemesi şeklinde gerçekleştiği anlaşılmıştır (Şekil 4.32d2,d3).

Bozunma bölgesi daha yakından incelendiğinde ise nano/matriks kırılması ve kısmi çoklu filament fibriler bozunmalar ve çözgü filament demetlerinde eğilme burkulması olarak elde edilmiştir (Şekil 4.32d4). Nano kompozitlerin ve kontrol kompozit yapıların basma yükü altında bozunma modlarının birbirlerine benzediği ve aksiyal kat arası açılmalar ve geleneksel filament burkulmaları olarak kendisini gösterdiği tespit edilmiştir.



Şekil 4.32. Para-aramid/epoksi nano kompozitlerde statik basma sonrası bozunma modları. (a1 ve a2) Para-aramid/epoksi kompozit sırası ile bozunun ön yüz ve çözgü boyu kesit(dijital foto), (a3 ve a4) Büyütülmüş sırası ile bozunun çözgü yönü kesit(optik mikroskop x6.7, FESEM x35), (b1 ve b2) Para-aramid/epoksi nano bor karbür(B4C) kompozit sırası ile bozunun ön yüz ve çözgü boyu kesit(dijital foto), (b3 ve b4) Büyütülmüş sırası ile bozunun çözgü yönü kesit (optik mikroskop x6.7, FESEM x35), (c1 ve c2) Para-aramid/epoksi grafan nano plaka(GNPs) kompozit sırası ile bozunun ön yüz ve çözgü yönü kesit(dijital foto), (c3 ve c4) Büyütülmüş sırası ile bozunun çözgü yönü kesit(optik mikroskop x6.7, FESEM x200), (d1 ve d2) Para-aramid/epoksi hibrit nano bor karbür(B4C)/grafan nano plaka(GNPs) kompozit sırası ile bozunun ön yüz ve çözgü yönü kesit(dijital foto) ve (d3 ve d4) Büyütülmüş sırası ile bozunun çözgü yönü kesit(optik mikroskop x6.7, FESEM x200).

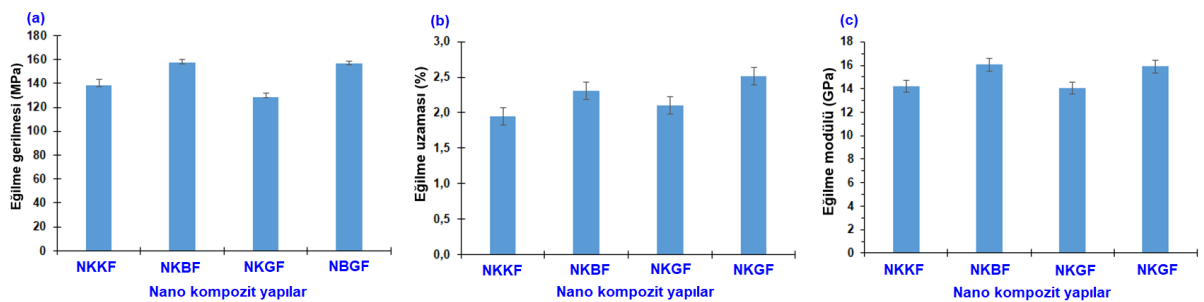
4.1.12. Para-aramid/epoksi nano kompozitlerde statik eğilme (3-nokta) sonuçları

4.1.12.1. Eğilme gerilme(MPa)-uzama(%) ve modül sonuçları

Şekil 4.33(a-c)'de para-aramid/epoksi nano kompozitlerde statik eğilme sonuçları eğilme gerilmesi (MPa), eğilme uzaması (%) ve eğilme modül değerleri (GPa) üzerinden verilmiştir.

Şekil 4.33'den görüleceği üzere nano borkarbür katkılı p-aramid/epoksi kompozitin (NKBF) eğilme gerilmesi dayanımı (MPa), GNPs katkılı (NKGF), hibrit (NBGF) ve kontrol (NKKF) kompozitlere göre sırası ile %18,24, %0,57 ve %12,18 oranlarda daha yüksek olarak elde edilmiştir. Öte yandan, elastik eğilme modül değerleri 14,06-16,05 GPa aralığında elde edilmiştir. Nano borkarbür katkılı p-aramid/epoksi kompozitin (NKBF) eğilme modülü (GPa), GNPs katkılı (NKGF), hibrit (NBGF) ve kontrol (NKKF) kompozitlere göre sırası ile %12,40, %0,94 ve %11,34 oranlarda daha yüksek çıkmıştır. Nano kompozitlerin eğilme uzama değerleri %2,30-2,51 aralığında elde edilmiştir. Nano kompozitlerin ortalama uzama değerini kontrol ile kıyasladığımızda %15,22'lik bir yükseliş tespit edilmiştir.

Nano borkarbür katkılı p-aramid/epoksi kompozitin (NKBF) eğilme performansının diğer kompozit yapıları göre daha yüksek çıkması önemli bir özellek iyileştirmesi olarak göz önüne alınarak, bunun nano bor karbürün basma özellikleri ile p-aramid lifin çekme özelliklerine bağlayabiliriz. Örneğin, eğilme yükünün kompozitin basma bölgesinde bor karbürden ve çekme bölgesinin de para-aramid lifinden gelerek bir sinerjinin ortaya çıktığı ileri sürülebilir.



Şekil 4.33. Para-aramid/epoksi nano kompozitlerde statik eğilme sonuçları. (a) Eğilme gerilmesi (MPa), (b) Eğilme uzaması (%) ve (c) Eğilme modül değerleri (GPa)

4.1.12.2. Eğilme bozunma modu sonuçları

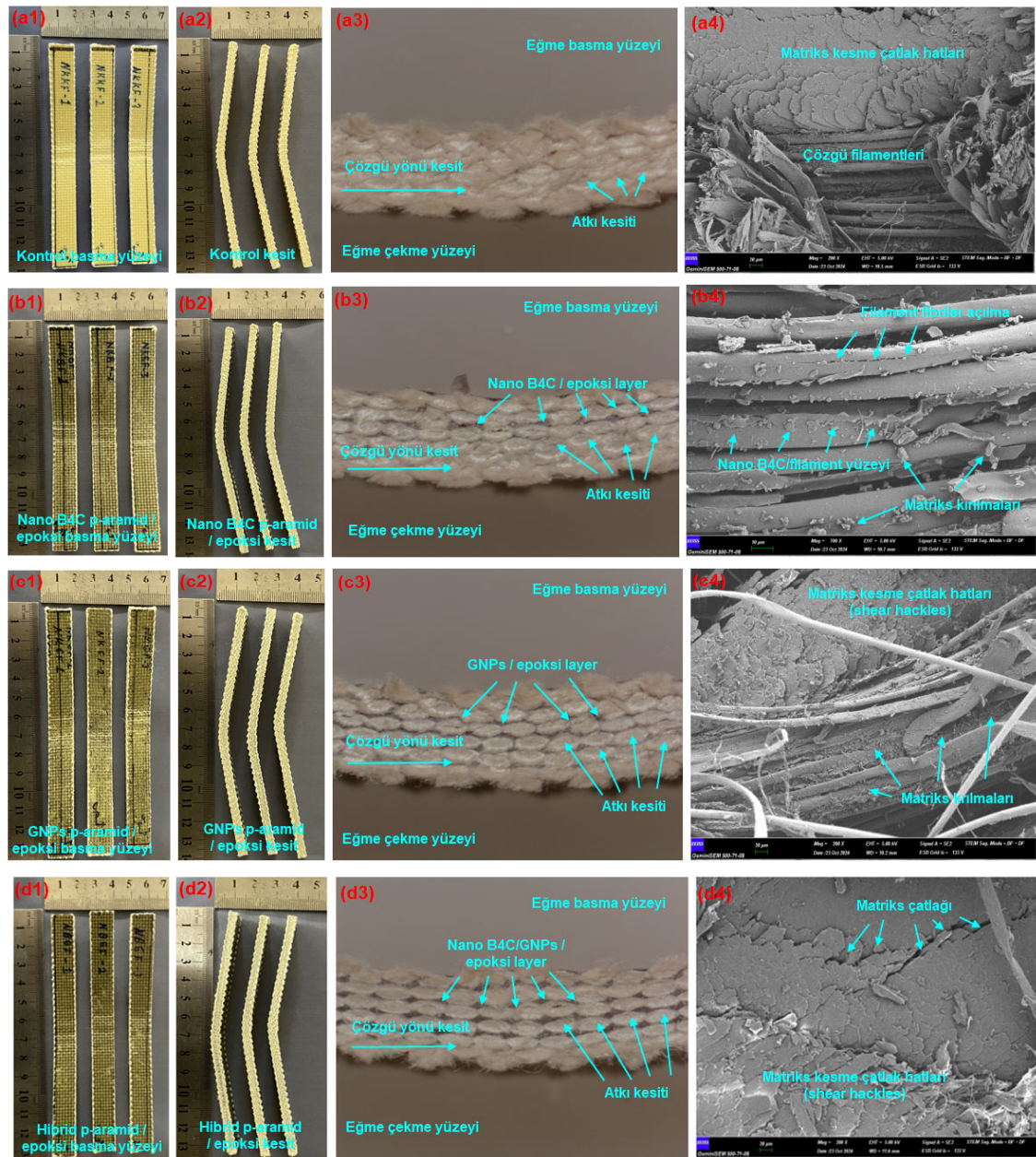
Şekil 4.34(a1-d4)'de para-aramid/epoksi nano kompozitlerde statik eğilme sonrası bozunma modları optik mikroskop ve FESEM görüntüleri üzerinden verilmiştir.

Şekil 4.34' den görüleceği üzere, kontrol (NKKF) yapısında eğilme yükü altında düzlem dışı büyük şekil değişimi ile tok bir davranış tespit edilmiştir (Şekil 4.34a1,a2). Yapının kesitinde ise kayma esaslı bölgesel küçük ölçekte kat açılması ve mikro ölçekte çatlama ilerlemesi elde edilmiştir (Şekil 4.34a3). Eğilen bölgenin kesiti daha yakından incelendiğinde epoksi matriks de çatlak hatları (shear hackles mark), çözgü filamentlerinde, matriks-filament ayrılmaları ve düşük değerde filamentlerde fibriler bozunmalar görülmüştür (Şekil 4.34a4).

Nano borkarbür eklemeli (NKBF) yapının bozunma modu incelendiğinde ise, eğilme yükü altında düzlem dışı şekil değişimi kontrol yapısına göre daha düşük değerde elde edilmiştir (Şekil 4.34b1,b2). Yapının kesitinde ise filament/matriks arayüzeyinde açılma, matriks kırılması, nano/matriks ve filament arasında bölgesel açılmalar ve filament uzunluğu boyunca fibriler açılma muhtemelen filamentin çapraz bağlarının düşük dirençlerinden dolayı gerçekleşmiştir (Şekil 4.34b3,b4).

GNPs eklemeli (NKGf) yapıda ise, eğilme yükü altında düzlem dışı şekil değişimi nano borkarbür eklemeli yapıyla aynı değerde elde edilmiştir (Şekil 4.34c1,c2). Yapının kesitinde ise filament/matriks arayüzeyinde kısmi açılma, matriks kırılması, epoksi matriks de kesme çatlak hatları (shear hackles mark), nano/matriks ve filament arasında bölgesel açılmalar ve çözgü filament demetinde eğilme esaslı bozunmalar tespit edilmiştir (Şekil 4.34c3,c4).

Hibrid (nh-B₄C ve GNPs) nano eklemeli (NBGF) yapının ise eğilme yükü altında bozunmanın, kompozit kesitinde düzlem dışı eğilme esaslı nh-B₄C ve GNPs katkılı yapılardaki şekil değişimine benzer bozunmalar elde edilmiştir (Şekil 4.34d1,d2). Matriks hibrid nano karışımında sürekli kesme çatlak hatları (shear hackles) ve matriks/hibrid nano çatlak ilerlemeleri yapının çözgü boyunca ki kesitinde tespit edilmiştir (Şekil 4.34d3,d4).



Şekil 4.34. Para-aramid/epoksi nano kompozitlerde statik eğilme yükü sonrası bozunma modları. (a1 ve a2) Para-aramid/epoksi kompozit sırası ile bozunan ön yüz ve çözgü boyu kesit(dijital foto), (a3 ve a4) Büyütülmüş sırası ile bozunan çözgü yönü kesit(optik mikroskop x6.7, FESEM x200), (b1 ve b2) Para-aramid/epoksi nano bor karbür(B4C) kompozit sırası ile bozunan ön yüz ve çözgü boyu kesit(dijital foto), (b3 ve b4) Büyütülmüş sırası ile bozunan çözgü yönü kesit (optik mikroskop x6.7, FESEM x200), (c1 ve c2) Para-aramid/epoksi grafan nano plaka(GNPs) kompozit sırası ile bozunan ön yüz ve çözgü yönü kesit(dijital foto), (c3 ve c4) Büyütülmüş sırası ile bozunan çözgü yönü kesit(optik mikroskop x6.7, FESEM x200), (d1 ve d2) Para-aramid/epoksi hibrit nano bor karbür(B4C)/grafan nano plaka(GNPs) kompozit sırası ile bozunan ön yüz ve çözgü yönü kesit(dijital foto) ve (d3 ve d4) Büyütülmüş sırası ile bozunan çözgü yönü kesit(optik mikroskop x6.7, FESEM x200).

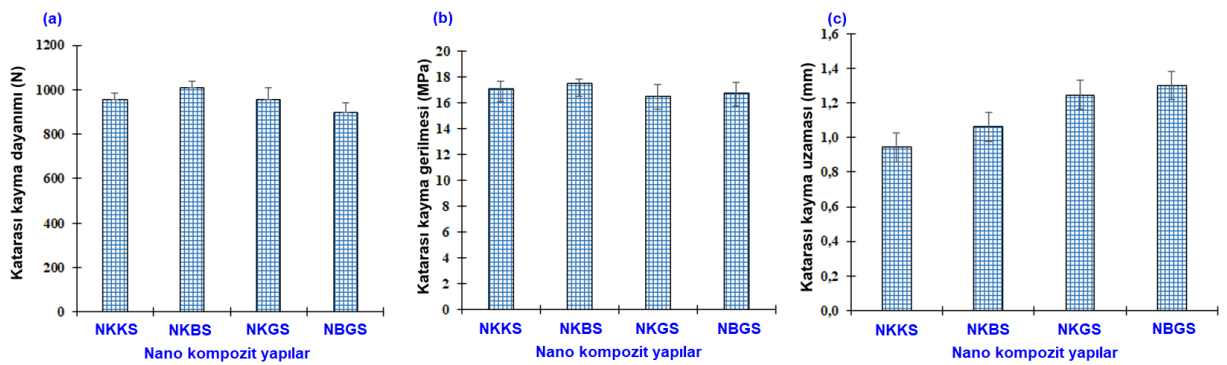
4.1.13. Para-aramid/epoksi nano kompozit statik katarası kayma dayanımı (kısıririş testi, short beam) sonuçları

4.1.13.1. Katarası kayma dayanım, gerilme(MPa) ve uzama(mm) sonuçları

Şekil 4.35(a-c)'de para-aramid/epoksi nano kompozitlerde statik katarası kayma sonuçları katarası kayma gerilmesi (MPa), uzaması (%) ve modül değerleri (GPa) üzerinden verilmiştir.

Şekil 4.35'den görüleceği üzere nano borkarbür katkılı p-aramid/epoksi kompozitin (NKBF) katarası kayma gerilmesi dayanımı (MPa), GNPs katkılı (NKGF), hibrit (NBGF) ve kontrol (NKKF) kompozitlere göre sırası ile %5,48, %4,34 ve %2,23 oranlarda daha yüksek olarak elde edilmiştir. Öte yandan, elastik katarası kayma modül değerleri 0,59-0,66 GPa aralığında elde edilmiş olup nano p-aramid/epoksi kompozitlerin (NKBF, NKGF ve NBGF) katarası kayma modül (GPa) değerleri ile kontrol (NKKF) kompozit arasında ihmal edilebilir farklılıklar elde edilmiştir. Nano kompozitlerin katarası kayma uzama değerleri %5,74-7,91 aralığında elde edilmiştir. Nano kompozitlerin ortalama uzama değerini kontrol la kıyasladığımızda ise %21,58 lik bir yükseliş tespit edilmiştir.

Nano borkarbür katkılı p-aramid/epoksi kompozitin (NKBF) katarası kayma performansının diğer kompozit yapılara göre az da olsa daha yüksek çıkması önemli bir özellik iyileştirmesi olarak göz önüne alınarak, bunun nano bor karbürün basma özellikleri ile p-aramid lifin çekme özelliklerine bağlayabiliriz. Örneğin nh-B4C nin kompozitin arayüzeyinde matrikse ekstra rijidlik sağlayarak katarası dayanımın iyileşmesine yardımcı olduğunu söyleyebiliriz.



Şekil 4.35. Para-aramid/epoksi nano kompozitlerde statik katarası kayma sonuçları. (a) Katarası kayma dayanımı (N), (b) Katarası kayma gerilimi (MPa) ve (c) Katarası kayma uzaması (mm).

4.1.13.2. Katarası kayma bozunma modu sonuçları

Şekil 4.36(a1-d4)'de para-aramid/epoksi nano kompozitlerde statik katarası kayma sonrası bozunma modları optik mikroskop ve FESEM görüntüleri üzerinden verilmiştir.

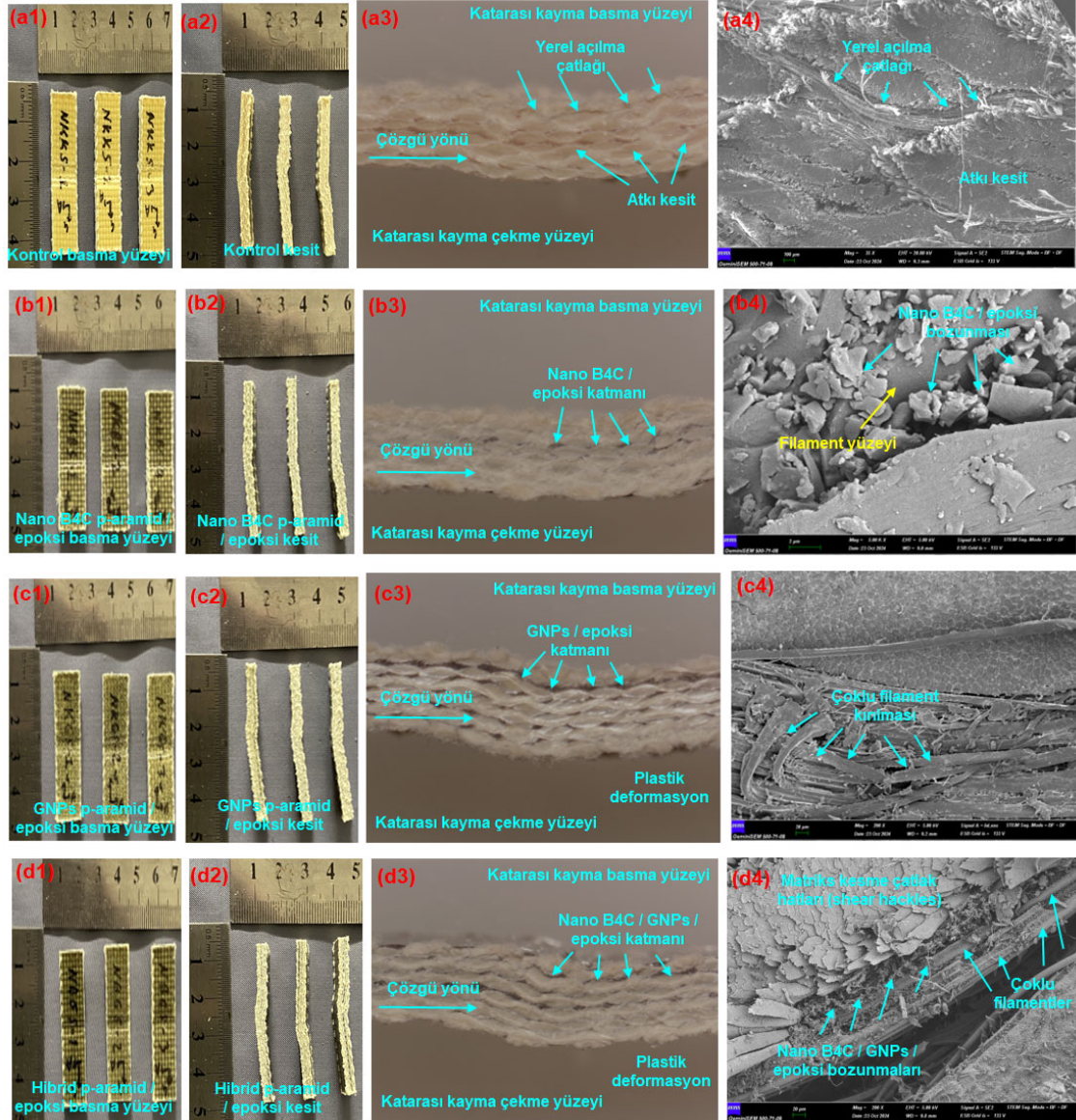
Şekil 4.36'den görüleceği üzere, kontrol (NKKF) yapısında kısa kiriş yükü altında basma yüzeyinde kalıcı basma izi (indentation mark) (Şekil 4.36a1), yapı kesitinde ise muhtelif boyutlarda katarası kayma çatlağı (Şekil 4.36a3) ve yapı uzunluğu boyunca elastik olmayan (inelastic) şekil değişimi (Şekil 4.36a2) tespit edilmiştir. Katarası kayma test bölgesinin kesiti daha yakından incelendiğinde epoksi matriks de çatlak hatları, çözgü-atkılı filament demetleri arayüzeyinde mikro açılmalar olarak kendisini göstermiştir (Şekil 4.36a4).

Nano borkarbür eklemeli (NKBF) yapının bozunma modu incelendiğinde ise, kısa kiriş yükü altında basma yüzeyinde kalıcı basma izi (Şekil 4.36b1), yapı kesitinde ise muhtelif boyutlarda mikro seviyede katarası kayma çatlağı (Şekil 4.36b3) ve yapı uzunluğu boyunca kontrol örneğine göre daha düşük düzeyde elastik olmayan (inelastic) şekil değişimi (Şekil 4.36b2) tespit edilmiştir. Katarası kayma test bölgesinin kesiti daha yakından incelendiğinde nh-B₄C/epoksi matriks de kırılmalar, çözgü filament demetleri arayüzeyinde matriksle soyulmalar olarak kendisini göstermiştir (Şekil 4.36b4).

GNPs eklemeli (NKGf) yapıda ise, kısa kiriş yükü altında basma yüzeyinde kalıcı derin basma izi (Şekil 4.36c1), yapı kesitinde ise muhtelif boyutlarda mikro seviyede katarası kayma çatlağı (Şekil 4.36c3) ve yapı uzunluğu boyunca kontrol örneğine göre daha yüksek seviyede elastik olmayan (inelastic) şekil değişimi (Şekil 4.36c2,c3) tespit edilmiştir. Katarası kayma test bölgesinin kesiti daha yakından incelendiğinde ise çoklu filament kırılması, çoklu GNPs/epoksi matriks de kırılmalar ve çözgü filament demetleri arayüzeyinde matriksle soyulmalar olarak kendisini göstermiştir (Şekil 4.36c4).

Hibrid (nh-B₄C ve GNPs) nano eklemeli (NBGF) yapının ise kısa kiriş yükü altında basma yüzeyinde kalıcı derin basma izi (Şekil 4.36d1), yapı kesitinde ise muhtelif boyutlarda mikro seviyede katarası kayma çatlağı (Şekil 4.36d3) ve yapı uzunluğu boyunca kontrol örneğine göre daha yüksek seviyede elastik olmayan (inelastic) şekil değişimi (Şekil 4.36d2,d3) tespit edilmiştir. Katarası kayma test bölgesinin kesiti daha yakından incelendiğinde ise çoklu filament kırılması, çoklu nh-B₄C/GNPs/epoksi matriks de kırılmalar, GNPs esaslı matriks kesme çatlak hatları (shear hackles) ve çözgü filament

demetleri arayüzeyinde matriksle soyulmalar olarak kendisini göstermiştir (Şekil 4.36d4).



Şekil 4.36. Para-aramid/epoksi nano kompozitlerde statik katarası kayma testi sonrası bozunma modları. (a1 ve a2) Para-aramid/epoksi kompozit sırası ile bozulan ön yüz ve çözgü boyu kesit(dijital foto), (a3 ve a4) Büyütülmüş sırası ile bozulan çözgü yönü kesit(optik mikroskop x6.7, FESEM x35), (b1 ve b2) Para-aramid/epoksi nano bor karbür(B4C) kompozit sırası ile bozulan ön yüz ve çözgü boyu kesit(dijital foto), (b3 ve b4) Büyütülmüş sırası ile bozulan çözgü yönü kesit (optik mikroskop x6.7, FESEM x5000), (c1 ve c2) Para-aramid/epoksi grafan nano plaka(GNPs) kompozit sırası ile bozulan ön yüz ve çözgü yönü kesit(dijital foto), (c3 ve c4) Büyütülmüş sırası ile bozulan çözgü yönü kesit(optik mikroskop x6.7, FESEM x200), (d1 ve d2) Para-aramid/epoksi hibrit nano bor karbür(B4C)/grafan nano plaka(GNPs) kompozit sırası ile bozulan ön yüz ve çözgü yönü kesit(dijital foto) ve (d3 ve d4) Büyütülmüş sırası ile bozulan çözgü yönü kesit(optik mikroskop x6.7, FESEM x200).

4.2. Sonuç ve Öneriler

4.2.1. Pull-out sonuçları ve öneriler

Kumaştan iplik çekme (Pull-out) çalışmaları kapsamında “ardıl sıkıştırma yöntemi” (iterative compression method) nano malzemenin soft kumaşa entegrasyonu kapsamında geliştirilmiştir. Böylelikle nano malzemeler para-aramid kumaşa fiziksel bir etkileşime girerek onlara tutunmuşlardır. Elde edilen, nano hegzagonal bor karbür (nh-B4C) ve MWCNTs eklemeli soft para-aramid kumaş yapıların sürtünme esaslı kumaştan iplik çekme performans sonuçları, GNPs eklemeli ve kontrol yapılara göre daha yüksek çıkarak özellikle nh-B4C eklemeli para-aramid kumaş yapılar soft balistik uygulamalar için çekici görünmektedir. Ayrıca, nh-B4C nin para-aramid kumaşa eklenmesi, yapının termal bozunma değerlerini yükeltmesi nedeni ile soft balistik uygulamalarda mermi-lif etkileşimi ile ortaya çıkan termal yüklerin karşılanarak, balistik performansın iyileştirileceği tahmin edilmektedir. Öte yandan, GNPs nin para-aramid yapının pull-out direncini düşürerek ona yağlayıcı bir etki yaptığı ortaya çıkarılmıştır.

CVD ile yüzeyde karbon nanotüp büyütmeli soft para-aramid kumaş yapıların sürtünme esaslı kumaştan iplik çekme performansı, PECVD ve kontrole göre daha yüksek çıkmakla birlikte nh-B4C den nerdeyse %25’in üzerinde daha düşük elde edilmiştir. Bunun nedeni CVD işleminin yüksek işlem sıcaklığı, filamentin moleküler yapısını bozmasından kaynaklı olduğu ileri sürülebilir. Ayrıca, yüksek işlem sıcaklığı nanocarbon tüp büyütmeli para-aramid ipliğin normal iplik çekme dayanımını da sıradışı olarak 5 kat düşürmüştür.

4.2.2. Sürtünme sonuçları ve öneriler

Nano hegzagonal bor karbür (nh-B4C) eklemeli soft para-aramid kumaş yapıların statik sürtünme katsayıları diğer yapılardan yüksek çıkmıştır. Bunun nedeni nano/filament arayüzeyleri, parçacık geometrisi ve bir derece yüzey pürüzlülüğü gibi faktörlere bağlanmakla birlikte, sürtünme katsayısı etkileri kendisini pull-out performansının iyileştirilmesinden göstermektedir.

CVD ile yüzeyde karbon nanotüp büyütmeli soft para-aramid kumaş yapıların statik sürtünme katsayısı, PECVD ve kontrole göre daha yüksek çıkmakla birlikte nh-B4C ye

yakın çıkmıştır. Bunun etkileri de kendisini pull-out özelliklerinin iyileştirmesinde göstermiştir.

Kinetik sürtünme katsayısında ise nano kaplamalı ve yüzey işlemlili para-aramid ipliklerin değerleri nerdeyse birbirine benzer çıkmıştır.

4.2.3. Balistik sonuçları ve öneriler

Nano hegzagonal bor karbür (nh-B₄C) eklemeli para-aramid/epoksi plakanın balistik performansı kontrol plaka ile önemli bir farklılık göstermemekle birlikte muhtemel enerji sönümleme mekanizması her bir katmanın düzleminde (in-plane) daha geniş bir alanın katılımı ile gerçekleşirken, bu düzlem dışında (out-of-plane) daha düşük şekil değişimi (deformasyonlar) şeklinde kendini göstermektedir. Bunun sebebi rijid nh-B₄C nin tok para-aramid filamentsi yapıya eklenmesi olup, sönümleme esnasında (energy mitigation) birden fazla mekanizmanın devreye girdiğini söyleyebiliriz. Bunlar, matriks-filament soyulması; pull-out esaslı şekil değişimi; matriks kırılması; nh-B₄C etrafında gerilim birikmesi (stress concentration) ve düşük ölçekli nano-matriks açılmaları (minor delamination); çoklu çatlak ve bunların yön değiştirmesi (crack deflection); kompleks yüksek gerilimli enerjinin çözgü-atkı üzerinden kumaş düzleminde dağılımı; katmanlar arası nano/matrikslerin yüksek şekil değişimli (high strain rate) gerilim dağıtımı gibi muhtemel mekanizmalardır. Böylelikle nano bor karbür/para-aramid/epoksi balistik plaka, hasar toleranslı (damage tolerance) malzeme olarak davranış gösterdiği şeklinde değerlendirilmiştir. Ayrıca, atış videoların izlenmesi sonucu, nano plakanın bozunması esnasında etrafa kopup saçılan parçacıkların (spall) yüzey matriksleri ile sınırlı olduğu ve bunun kullanım esnasında etrafa olası hasar vermesinin sınırlı olacağı şeklinde değerlendirilmiştir.

4.2.4. Ağırlık düşürme sonuçları ve öneriler

Nano ve kontrol kompozitin ağırlık düşürme yükü altında gösterdiği maksimum kuvvet değerlerinde herhangi bir farklılık görülmezken, nano bor karbür/para-aramid/epoksi kompozit diğer kompozit yapılarla kıyasla düşük bozunma alanı göstererek hasar toleransı iyileştirilmiş özellik göstermiştir.

4.2.5. Ağırlık düşürme sonrası basma (CALVI) sonuçları ve öneriler

Nano bor karbür/para-aramid/epoksi kompozitin CALVI dayanımı belirli bir miktar daha iyi bir performans göstermiştir. Ayrıca, CALVI yükü altında hem nano ve hem de kontrol kompozitlerde çoklu katman burkulması (kinking) sonucu bölgesel malzeme şişmesi (swelling), çoklu çözgü burkulması (multiple warp kinking zone) ve atkı filamentlerinin yığılması (multiple filling accumulation) sonucu malzeme yoğunlaşması (fiber migration) elde edilmiştir. Böylelikle, nano bor karbür/para-aramid/epoksi kompozitler de dahil olmak üzere test edilen kompozitlerden malzeme yığılması esaslı bir bozunma modu elde edilmiştir.

4.2.6. Mekanik sonuçlar ve öneriler

4.2.6.1. Çekme

Nano bor karbür/para-aramid/epoksi kompozitin çekme dayanım performansı kontrol kompozite göre daha az değerde (%5 civarı) düşük çıkmıştır. Bunun bir derece bor karbürün karakteristik düşük çekme (çekme dayanımı: 150-400 MPa) [12] ve para-aramidin yüksek çekme (çekme dayanımı: 3200 MPa, çekme modülü: 115 GPa) [27] özelliklerinden kaynaklandığı ileri sürülebilir. Ancak bozunma modları incelendiğinde nano bor karbür/para-aramid/epoksi nin katarası açılma modunu (Mode-I) sınırladığı ve kontrole göre geniş katamanlar arası açılmayı önleyerek yapıya hasar toleransı iyileştirme özelliği kazandırdığı anlaşılmıştır.

4.2.6.2. Basma

Nano bor karbür/para-aramid/epoksi kompozitin basma dayanım performansı kontrol kompozite göre bir miktar (%7 civarı) yüksek çıkmıştır. Bunun bor karbürün karakteristik yüksek basma özelliklerinden (basma dayanımı: 2900-3500 MPa, basma modülü: 450-470 GPa) [12] kaynaklandığı ve kendisini kompozit yapıda iyi bir derece gösterdiği anlaşılmıştır.

4.2.6.3. Katarası basma (aksiyal)

Nano bor karbür/para-aramid/epoksi balistik plakanın çözgü yönü gözardı edilirse atkı yönü statik katarası basma (aksiyal) dayanım performansı kontrol plakaya göre az değerde (%1,5 civarı) yüksek çıkmıştır. Katarası basma (aksiyal) özelliklerin matriks

özelliklerine bağlı olduğu ve burada bor karbürün matrikse eklenmesinin az da olsa bir etkisinin olduğu sonucuna varılmıştır.

4.2.6.4. Katarası basma (kalınlık)

Para-aramid/epoksi balistik plakanın ortalama statik katarası basma (kalınlık) dayanım performansı nano bor karbür/para-aramid/epoksi balistik plakaya göre az değerde (%8,5 civarı) yüksek çıkmıştır. Bu sonuç beklenmemekle birlikte daha detaylı çalışmaların bu konuda yürütülmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Özellikle epoksiye nano bor karbürün eklenmesi ve karışımın para-aramid filamentlerinden oluşan kumaş yapısındaki davranışlarının daha detaylı belirlenmesi gereklidir.

4.2.6.5. Eğilme

Nano bor karbür/para-aramid/epoksi kompozitin eğilme dayanım performansı kontrol kompozite göre (%12 civarı) yüksek çıkmıştır. Bunun bir derece bor karbürün karakteristik daha iyi eğilme dayanımı (300-600 MPa) [12] ve para-aramidin yüksek çekme (çekme dayanımı: 3200 MPa, Çekme modülü: 115 GPa) [230] özelliklerinden kaynaklandığı ileri sürülebilir. Dolayısı ile nano bor karbürün para-aramid yapıya eklenmesi yapıya sinerjik bir özellik kazandırmıştır.

4.2.6.6. Katarası kayma (short beam)

Nano bor karbür/para-aramid/epoksi kompozitin katarası kayma dayanım performansı kontrol kompozite göre (%2 civarı) yüksek çıkmıştır. Bunun bir derece bor karbürün karakteristik kayma modülü (193-200 GPa) [12] ve para-aramidin yüksek çekme (çekme dayanımı: 3200 MPa, çekme modülü: 115 GPa) [230] özelliklerinden kaynaklandığı ileri sürülebilir. Dolayısı ile nano bor karbürün para-aramid yapıya eklenmesi yapıya sinerjik bir özellik kazandırmıştır. Öte yandan, nano bor karbür/para-aramid/epoksi kompozitin katarası kayma dayanım performansının, grafen katkılıya göre daha iyi çıkması (%5,5 civarı) nano grafenin geometrik iki boyutlu plaka ve bu plakaların kendi üzerlerine kolayca kayması olarak ileri sürülmüştür [206].

Genel sonuç olarak, nano hegzagonal bor karbür, çok duvarlı karbon nanotüplerin para-aramid kumaşa eklenmesi, kumaştan iplik çekme (pull-out) özelliklerini sürtünme esaslı iyileştirmeleri nedeni ile soft balistik yapılarda kullanılması için uygun bir malzeme olarak değerlendirilmiştir.

Öte yandan, nano hegzagonal bor karbür katkılı para-aramid/epoksi plakanın balistik performansı kontrol plaka ile önemli bir farklılık göstermemesine karşın hasar toleransı iyileştirmiş davranış sergilemiştir. Ayrıca, nano katkılı hegzagonal bor karbür ve çok duvarlı nanotüp katkılı para-aramid/epoksi kompozitlerin statik yüklemelerdeki mekanik, düşük hızdaki darbe ve darbe sonrası basma performansları kontrol kompozite göre önemli bir farklılık göstermezken hasar toleranslı malzeme davranışı göstermiştir. Bu performans artışı nano katkılı h-B₄C ve MWCNTs para-aramid/epoksi kompozit malzemeleri uzay/havacılık ve savunma endüstrisi için alternatif bir malzeme potansiyeline sahip hale getirmiştir.



KAYNAKÇA

1. Bilisik, K., 2017. Two dimensional (2D) fabrics and three dimensional (3D) preforms for ballistic and stabbing protection: A review, **Textile Research Journal**, **87** (18): 2275-2304.
2. Ralph, C., Baker, L., Archer, E., McIlhagger, A., 2023. Optimization of soft armor: the response of homogenous and hybrid multi-ply para-aramid and ultra-high molecular weight polyethylene fabrics under ballistic impact, **Textile Research Journal**, 2023, **93**(23–24): 5168–5186.
3. Palola, S., Vuorinen, J., Noordermeer, J.W.M., Sarlin, E., 2020. Development in Additive Methods in Aramid Fiber Surface Modification to Increase Fiber-Matrix Adhesion: A Review, **Coatings**, **10**; 556.
4. Gore, P.M., Kandasubramanian, B., 2018. Functionalized Aramid Fibers and Composites for Protective Applications: A Review, **Industrial & Engineering Chemistry Research**, **57**: 16537–16563.
5. Chen, J., Zhu, Y., Ni, Q., Fu, Y., Fu, X., 2014. Surface modification and characterization of aramid fibers with hybrid coating. **Applied Surface Science**, **321**: 103–108.
6. Chu, Y., Chen, X., Tian, L., 2017. Modifying friction between ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) yarns with plasma enhanced chemical vapour deposition (PCVD), **Applied Surface Science**, **406**: 77–83.
7. Chen, W., Qian, X., He, X., Liu, Z., Liu, J., 2011. Surface modification of Kevlar by grafting carbon nanotubes, **Journal of Applied Polymer Science**, **123**: 1983–1990.
8. Biradar, A., Arulvel, S., Kandasamy, J., 2023, Significance of ballistic parameters and nanohybridization in the development of textile-based body armor: A review, **International Journal of Impact Engineering**, **180**: 104700.
9. Mylvaganam, K., and Zhang, L., 2007. Ballistic resistance capacity of carbon nanotubes, **Nanotechnology**, **18**(47), p. 475701.
10. Bizao, R. A., Machado, L. D., Sousa, J. M., Pugno, N. M., 2018, Scale effects on the ballistic penetration of graphene sheets, **Scientific reports**, **8**(1): 1–8.
11. Piyush, G., Poonam, S., Karan G., Tabrej, K., Aloufi, M., 2023, A Comprehensive Review of Graphene-Based Nanomaterials for Ballistic and Impact Resistance in Defence Applications. **Heliyon**, **9**(3):14279.

12. Gallo, L.S.A., Villas Boas, M.O.C., Rodrigues, A.C.M., Melo, F.C.L., Zanotto, E.D., 2019, Reviewe article: Transparent glass–ceramics for ballistic protection: materials and challenges, **Journal of Materials Research and Technology**, **8**(3): 3357–3372.
13. Domnich, V., Reynaud, S., Haber, R.A., Chhowalla, M., 2011, Boron Carbide: Structure, Properties, and Stability under Stress, **Journal of the American Ceramic Society**, **94**(11): 3605–3628.
14. Suri, A.K., Subramanian, C., Sonber, J.K., Murthy, T.S.R.C., 2010, Boron carbide: Production, properties, and applications, **International Materials Reviews**, **55**(1): 1.
15. Thevenot, F., 1990, Boron carbide – A comprehensive review, **Journal of the European Ceramic Society**, **6**(3): 205–225.
16. Bajya, M., Majumdar, A., Butola, B.S., 2023, A review on current status and development possibilities of soft armour panel assembly, **Journal of Materials Science**, **58**(38): 14997–15020.
17. Mawkhlieng, U., Majumdar, A., Laha, A., 2020, A review of fibrous materials for soft body armour applications, **RSC Advances**, **10**(2): 1066–1085.
18. Reneker, D.H., Chun, I., 1996, Nanometre diameter fibres of polymer, produced by electrospinning, **Nanotechnology**, **7**(3): 216–223.
19. Al-Saleh, M.H., Sundararaj, U., 2011, Review of the mechanical properties of carbon nanofiber/polymer composites, **Composites Part A**, **42**(12): 2126–2142.
20. Zhang, X., Wang, A., Zhou, X., Chen, F., Fu, Q., 2020, Fabrication of aramid nanofiber-wrapped graphene fibers by coaxial spinning, **Carbon**, **165**: 340–348.
21. Cheeseman, B.A., Bogetti, T.A., 2003, Ballistic impact into fabric and compliant composite laminates, **Composite Structures**, **61**: 161–173.
22. Wu, S.-Y., Sikdar, P., Bhat, G.S., 2022, Recent progress in developing ballistic and anti-impact materials: Nanotechnology and main approaches, **Defence Technology**, **18**(12): 1845–1864.
23. Junare, N., Vakil, M., Rajpurohit, A., Ahuja, P., Joshi, A., 2022, 3 dimensional fabrics for ballistic impact response: A Critical Evaluation, **International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)**, **16**(4): 1291–1306.
24. Tran, P., Ngo, T., Yang, E.C., Mendis, P., Humphries, W., 2014, Effects of architecture on ballistic resistance of textile fabrics: Numerical study, **International Journal of Damage Mechanics**, **23**(3): 359–376.
25. Barhoumi, H., Bhourri, N., Feki, I., Baffoun, A., Hamdaoui, M., Ben Abdessalem, S., 2022, Review of ballistic protection materials: Properties and performances, **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, **42**(13–14): 685–699.

26. MIL-STD-662F, 1997. V50 ballistic test for armor, US Army Research Laboratory, Weapons & Materials Research Directorate, Aberdeen Proving Ground, MD.
27. Bilisik, K., 2011, Bending behavior of multilayered and multidirectional stitched aramid woven fabric structures, **Textile Research Journal**, **81**(17): 1748–1761.
28. Chou, T.W., Microstructural Design of Fiber Composites, Cambridge University Press, Cambridge, 1992, 300-400 s.
29. Cox, B.N., Dadkhah, M.S., Morris, W.L., Flintoff, J.G., 1994, Failure mechanisms of 3D woven composites in tension, compression, and bending, **Acta Metallurgica et Materialia**, **42**(10): 3967–3984.
30. Kamiya, R., Cheeseman, B.A., Popper, P., Chou, T.W., 2000, Some recent advances in the fabrication and design of three-dimensional textile preforms: a review, **Composites Science and Technology**, **60**(1): 33–47.
31. Bilisik, K., Chapter 18: Aramid fiber reinforced composites, in Fibre reinforced composites: Constituents, compatibility, perspectives and applications, Eds: Kuruvilla Joseph, Kristiina Oksman, Gejo George, Runcy Wilson, and Saritha A, ELSEVIER LIMITED, Cambridge, MA, USA, March 22, 2021, 515-550 s.
32. Bilisik, K., 2010, Multiaxis 3D woven preform and properties of multiaxis 3D woven and 3D orthogonal woven carbon/epoxy composites, **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, **29**(8): 1173–1186.
33. Bilisik, K., Sahbaz, N., 2012, Structure-unit cell base approach on three dimensional representative braided preforms from 4-step braiding: Experimental determination of effect of structure-process parameters on predetermined yarn path, **Textile Research Journal**, **82**(3): 220–241.
34. Hoffmann, J., Brast, A., Scharr, G., 2019, Z-pin insertion process for through-thickness reinforced thermoplastic composites, **Journal of Composite Materials**, **53**(2): 173–181.
35. Dell'Anno, G., Cartié, D.D., Partridge, I.K., Rezai, A., 2007, Exploring mechanical property balance in tufted carbon fabric/epoxy composites, **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, **38**(11): 2366–2373.
36. Tong, L., Mouritz, A.P., Bannister, M.K., 2002, 3D Fibre Reinforced Polymer Composites, **Elsevier**, New York.
37. Allen, M.J., Tung, V.C., Kaner, R.B., 2010, Honeycomb carbon: A review of graphene, **Chemical Reviews**, **110**(1): 132–145.
38. Jang, B.Z., Zhamu, A., 2008, Processing of nanographene platelets (NGPs) and NGP nanocomposites: A review, **Journal of Materials Science**, **43**(15): 5092–5101.

39. Potts, J.R., Dreyer, D.R., Bielawski, C.W., Ruoff, R.S., 2011, Graphene-based polymer nanocomposites, **Polymer**, **52**(1): 5–25.
40. Garcia, E.J., Wardle, B.L., Hart, A.J., 2008, Joining prepreg composite interfaces with aligned carbon nanotubes, **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, **39**(6): 1065–1070.
41. Wang, X., Jiang, M., Zhou, Z., Gou, J., Hui, D., 2017, 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective, **Composites Part B: Engineering**, **110**: 442–458.
42. Khan, S.U., Kim, J.K., 2011, Impact and delamination failure of multiscale carbon nanotube-fiber reinforced polymer composites: A review, **International Journal of Aeronautical and Space Sciences**, **12**(2): 115–133.
43. ENPY320. Zhou, Y., Ali, M., Gong, X., Yang, D., 2017, An overview of yarn pull-out behavior of woven fabrics, **Textile Research Journal**, **89**(2): 223–234.
44. Kirkwood, K.M., Kirkwood, J.E., Lee, Y.S., Ronald, G., Egres, J.R., 2004, Yarn pull-out as a mechanism for dissipating impact energy in Kevlar KM-2 fabric Part I: Quasi-static characterization of yarn pull-out, **Textile Research Journal**, **74**(10): 920–928.
45. Bilisik, K., 2011, Properties of yarn pull-out in para-aramid fabric structure and analysis by statistical model, **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, **42**(12): 1930–1942.
46. Dong, Z., Sun, C.T., 2009, Testing and modeling of yarn pull-out in plain Kevlar fabrics, **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, **40**(12): 1863–1869.
47. Bazhenov, S., 1997, Dissipation of energy by bulletproof aramid fabric, **Journal of Materials Science**, **32**(12): 4167–4173.
48. Bilisik, K., 2013, Stick-Slip Behavior of Para-Aramid (Twaron®) Fabric in Yarn Pull-Out, **Textile Research Journal**, **83**(1): 13–33.
49. Thomas, F.D., Roark, J., Moy, P., Sockalingam, S., O'Brien, D.J., Weerasooriya, T., 2024, Experiments and simulations for dynamic yarn pull-out response of Kevlar® fabrics, **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, **181**: 108147.
50. Nasser, J., Groo, L., Zhang, L., Sodano, H., 2020, Laser induced graphene fibers for multifunctional aramid fiber reinforced composite, **Carbon**, **158**: 146–156.
51. Martinez, M.A., Abenojar, J., Enciso, B., Velasco, F.J., 2017, Effect of atmospheric plasma torch on ballistic woven aramid, **Textile Research Journal**, **87**(19): 2358–2367.

52. Sun, D., Chen, X., 2012, Plasma modification of Kevlar fabrics for ballistic applications, **Textile Research Journal**, **82**(18): 1928–1934.
53. Nejman, A., Kamińska, I., Jasińska, I., Celichowski, G., Cieślak, M., 2020, Surface modification of aramid fibers using plasma treatment, **Materials**, **13**(17): 3912.
54. Guo, F., Zhang, Z.-Z., Liu, W.-M., Su, F.-H., Zhang, H.-J., 2009, Effect of plasma treatment of Kevlar fabric on the tribological behavior of Kevlar fabric/phenolic composites, **Tribology International**, **42**(3): 243–249.
55. Brown, J.R., Chappell, P.J.C., Mathys, Z., 1991, Plasma surface modification of advanced organic fibres: Part I-Effects on the mechanical, fracture and ballistic properties of aramid/epoxy composites, **Journal of Materials Science**, **26**(15): 4172–4178.
56. Chamola, R., Das, S., Ahlawat, D.S., Mishra, Y.K., Goyat, M.S., 2024, Recent developments in shear thickening fluid-impregnated synthetic and natural fiber-reinforced composites for ballistic applications: A review, **Journal of Materials Science**, **59**(3): 747–793.
57. Tan, Y., Ma, Y., Li, Y., 2023, Shear thickening fabric composites for impact protection: A review, **Textile Research Journal**, **93**(5–6): 1419–1444.
58. Park, Y., Kim, Y.H., Baluch, A.H., Kim, C.G., 2014, Empirical study of the high velocity impact energy absorption characteristics of shear thickening fluid (STF) impregnated Kevlar fabric, **International Journal of Impact Engineering**, **72**: 67–74.
59. Li, D., Wang, R., Guan, F., Zhu, Y., You, F., 2022, Enhancement of the quasi-static stab resistance of Kevlar fabrics impregnated with shear thickening fluid, **Journal of Materials Research and Technology**, **18**: 3673–3683.
60. Boisse, P., Hamila, N., Guzman-Maldonado, E., Madeo, A., Hivet, G., et al., 2017, The bias-extension test for the analysis of in-plane shear properties of textile composite reinforcements and prepreps: A review, **International Journal of Material Forming**, **10**(4): 473–492.
61. Bai, R., Ma, Y., Lei, Z., Feng, Y., Liu, C., 2019, Energy analysis of fabric impregnated by shear thickening fluid in yarn pullout test, **Composites Part B: Engineering**, **174**: 106914
62. Gawandi, A., Thostenson, E.T., Gilliespie Jr., J.W., 2011, Tow pullout behavior of polymer-coated Kevlar fabric, **Journal of Materials Science**, **46**: 77–89.
63. Mia, R., Sultana, S., Bhuiyan, M.S.K., & Islam, M.M., 2022, Improving ballistic performance of Kevlar fabrics by resin treatment, **The Journal of The Textile Institute**, **113**(8): 1131–1139.

64. Khodadadi, A., Liaghat, G., Taherzadeh-Fard, A., Shahgholian-Ghahfarokhi, D., 2021, Impact characteristics of soft composites using shear thickening fluid and natural rubber – A review of current status, **Composite Structures**, **271**: 114076.
65. Tan, Y., Zhang, H., Peng, S., 2016, Electrically conductive graphene nanoplatelet/boron carbide composites with high hardness and toughness, **Scripta Materialia**, **114**: 98–102.
66. Gürgen, S., Majumdar, A., 2019, Tuning the frictional properties of carbon fabrics using boron carbide particles, **Fibers and Polymers**, **20**(4): 725–731.
67. Gowthaman, S., Srinu, B., Balaganesan, G., 2023, Effects of ZnO nanowire and silica coatings on the inter-yarn friction and ballistic properties of Kevlar fabrics, **International Journal of Impact Engineering**, **178**: 104054.
68. Fan, J., Shi, Z., Zhang, L., Wang, J., Yin, J., 2012, Aramid nanofiber-functionalized graphene nanosheets for polymer reinforcement, **Nanoscale**, **4**: 7046–7055.
69. Lin, J., Bang, S.H., Malakooti, M.H., Sodano, H.A., 2017, Isolation of aramid nanofibers for high strength and toughness polymer nanocomposites, **ACS Applied Materials & Interfaces**, **9**: 11167–11175.
70. Ahmad, Z., Al-Sagheer, F., Shiju, J., 2016, Aramid-multiwalled carbon nanotube nanocomposites: Effect of compatibilization through oligomer wrapping of the nanotubes, **Polymer International**, **65**: 1204–1213.
71. Shiju, J., Al-Sagheer, F., Bumajdad, A., Ahmad, Z., 2018, In-situ preparation of aramid-multiwalled CNT nano-composites: Morphology, thermal, mechanical and electric properties, **Nanomaterials**, **8**: 309.
72. Wang, L., Shi, Y., Sa, R., Ning, N., Wang, W., Tian, M., Zhang, L., 2016, Surface modification of aramid fibers by catechol/polyamine codeposition followed by silane grafting for enhanced interfacial adhesion to rubber matrix, **Industrial & Engineering Chemistry Research**, **55**: 12547–12556.
73. Talreja, K., Chauhan, I., Ghosh, A., Majumdar, A., Butola, B.S., 2017, Functionalization of silica particles to tune the impact resistance of shear thickening fluid treated aramid fabrics, **RSC Advances**, **7**: 49787
74. Tan, V.B.C., Shim, V.P.W., Zeng, S.X., 2005, Modeling crimp in woven fabrics subjected to ballistic impact, **International Journal of Impact Engineering**, **32**: 561–574.
75. Bai, R., Ma, Y., Lei, Z., Feng, Y., Zou, J., Liu, D., 2020, Shear deformation and energy absorption analysis of flexible fabric in yarn pullout test, **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, **128**: 105678.

76. Rao, M.P., Duan, Y., Keefe, M., Powers, B.M., Bogetti, T.A., 2009, Modeling the effects of yarn material properties and friction on the ballistic impact of a plain-weave fabric, **Composite Structures**, **89**: 556–566.
77. López-Gálvez, H., Rodríguez-Millán, M., Feito, N., Miguelez, H., 2016, A method for inter-yarn friction coefficient calculation for plain weave of aramid fibers, **Mechanics Research Communications**, **74**: 52–56.
78. Cornelissen, B., Rietman, B., Akkerman, R., 2013, Frictional behaviour of high performance fibrous tows: Friction experiments, **Composites: Part A**, **44**: 95–104.
79. Walter, M.K., 1975, A new instrument to measure textile fiber friction by a yarn-to-yarn technique, **Textile Research Journal**, **45**(9): 639–648.
80. Liu, L., Chen, J., Zhu, B., Yu, T. X., Tao, X. M., Cao, J., 2006. *The yarn-to-yarn friction of woven fabrics*, pp. 123-127. *Proceeding of 9th International ESAFORM Conference on Materials Forming*, Glasgow, UK, April 26-28.
81. Asayesh, A., Asgharian Jeddi, A.A., Rezaei, M., 2017, Utilization of the yarn pullout test in estimation of the reserved energy of rib knitted fabrics, **The Journal of The Textile Institute**, **108**(8): 1350–1356.
82. Pan, N., Kovar, R., Dolatabadi, M.K., Wang, P., Zhang, D., Sun, Y., Chen, L., 2015, Origin of tensile strength of a woven sample cut in bias directions, **Royal Society Open Science**, **2**: 140499.
83. Qi, Y., Iqbal, W., Jiang, Y., 2022, Study on the multi-directional static friction properties of high performance yarns, **Fibres & Textiles in Eastern Europe**, **151**(3): 111–115.
84. Briscoe, B.J., Motamedi, F., 1992, The ballistic impact characteristics of aramid fabrics: The influence of interface friction, **Wear**, **158**: 229–247.
85. Gassara, H.E., Barbier, G., Wagner Kocher, C., Sinoimeri, A., Pumo, B., 2018, Experimental evaluation of transverse friction between fibers, **Tribology International**, **119**: 112–122.
86. Duan, Y., Keefe, M., Bogetti, T.A., Cheeseman, B.A., Powers, B., 2006, A numerical investigation of the influence of friction on energy absorption by a high-strength fabric subjected to ballistic impact, **International Journal of Impact Engineering**, **32**(8): 1299–1312.
87. Laible, R. C., 1980. Fibrous armor, pp. 1-30. In: *Ballistic materials and penetration mechanics* (Ed. R. C. Laible). Elsevier Applied Science, New York, USA.
88. Wikipedia, 2025. Bulletproof vest. Website: https://en.wikipedia.org/wiki/Bulletproof_vest (Erişim tarihi: 9 Nisan 2025).

89. Verdi, A., Bulut, M.O., 2022, NIJ Standard: Seviye-IV Korumalı Zırh Bileşenlerinin İncelenmesi ve Balistik Koruma Standartları, **Teknik Bilimler Dergisi**, **12**(1): 69-81.
90. Bilisik, K., Turhan, Y., 2009, Multidirectional stitched layered aramid woven fabric structures and their experimental characterization of ballistic performance, **Textile Research Journal**, **79**: 1331–1343.
91. Bilisik, K., Korkmaz, M., 2010, Multilayered and multidirectional stitched aramid woven fabric structures: Experimental characterization of ballistic performance by considering yarn pull-out test, **Textile Research Journal**, **80**: 1697–1720.
92. Raftenberg MN, Schneider M, Moynihan TJ, et al, 2005. Plain woven, 600 denier Kevlar KM2 fabric under quasi static, uniaxial tension, Army Research Laboratory. Report no. ARL-TR-3437.
93. Pineda E, Hogue C and Goldsmith W, 2003. Ballistic properties of zylon for application to firearm projectile protection, Army Research Laboratory. Report no. ARL-CR-529.
94. Rosset WS, 2003. Patterned armor performance evaluation for multiple impacts, Army Research Laboratory. Report no. ARL-TR-3038.
95. Lee, Y.S., Wetzel, E.D., Wagner, N.J., 2003, The ballistic impact characteristics of Kevlar woven fabrics impregnated with a colloidal shear thickening fluid, **Journal of Materials Science**, **38**: 2825–2833.
96. Bilisik, K., 2012, Multiaxis three dimensional weaving for composites: A review, **Textile Research Journal**, **82**: 725–743.
97. Bilisik, K., Karaduman, N.S., Bilisik, N.E., Bilisik, H.E., 2013, Three dimensional (3D) fully interlaced woven preforms for composites, **Textile Research Journal**, **83**: 2060–2084.
98. Bilisik, K., 2013, Three dimensional braiding for composites: A review, **Textile Research Journal**, **83**(13): 1414–1436.
99. Abdulghaffar, H., 2016, Study on the Arrangement of Fabric Materials for Multi-Layer Soft Body Armor Based on Their Mechanical Properties, **Journal of Fashion Technology & Textile Engineering**, **4**(1): 1–5.
100. Morner, B., Eeg-Olofsson, T., 1957, Measurement of the shearing properties of fabrics, **Textile Research Journal**, **27**: 611–615.
101. Treloar, L.R.G., 1965, The effect of test piece dimensions on the behavior of fabrics in shear, **Journal of Textile Institute**, **56**: T533–T550.

102. Kawabata, S., Nonlinear mechanics of woven and knitted materials, in: Chou, T.W. and Ko, F.K. (eds), *Textile structural composites*, Elsevier Science Publisher B.V., New York, USA, 1989.
103. Erlich, D.C., Shockey, D.A., Simons, J.W., 2003, Slow penetration of ballistic fabrics, **Textile Research Journal**, **73**: 179–184.
104. Grosberg, P., Swani, N.M., 1966, The mechanical properties of woven fabrics part IV: The determination of the bending rigidity and frictional restraint in woven fabrics, **Textile Research Journal**, **36**: 338–345.
105. Hearle, J.W.S., Grosberg, P., and Backer, S., *Structural mechanics of fibers, yarn and fabrics*, Wiley Interscience Inc., New York, 1969.
106. Hu, J., *Structure and mechanics of woven fabrics*, Woodhead Publishing Ltd., Cambridge, UK, 2004.
107. Decker, M.J., Halbach, C.J., Nam, C.H., et al., 2007, Stab resistance of shear thickening fluid (STF)-treated fabrics, **Composites Science and Technology**, **67**: 565–578.
108. Hohenstein Institute, DuPont, 2020. Reliable assessment of body armour wearability: Development of new test methods. (Website: <https://www.hohenstein.us/en-us/press/press-releases/hohenstein-and-dupont-develop-reliable-assessment-of-body-armour-wearability>) (Erişim tarihi: Nisan 2025).
109. Mouritz, A.P., 2001, Ballistic impact and explosive blast resistance of stitched composites, **Composites Part B: Engineering**, **32**: 431–439.
110. Liu, D., 1990, Delamination resistance in stitched and unstitched composite plates subjected to impact loading, **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, **9**: 59–69.
111. Yoshimura, A., Nakao, T., Yashiro, S., et al., 2008, Improvement on out-of-plane impact resistance of CFRP laminates due to through-the-thickness stitching, **Composites Applied Science and Manufacturing**, **39**: 1370–1379.
112. Gellert, E.P., Cimpoeru, S.J., Woodward, R.L., 2000, A study of the effect of target thickness on the ballistic perforation of glass-fiber-reinforced plastic composites, **International Journal of Impact Engineering**, **24**: 445–456.
113. Hosur, M.V., Adya, M., Alexander, J., et al., 2003, Studies on impact damage resistance of affordable stitched woven carbon/epoxy composite laminates, **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, **22**: 927–952.
114. Hosur, M.V., Vaidya, U.K., Ulven, C., 2004, Performance of stitched/unstitched woven carbon/epoxy composites under high velocity impact loading, **Composites Structures**, **64**: 455–466.

115. Babu, M. G., Velmurugan, R., Gupta, N. K., 2006, Energy absorption and ballistic limit of targets struck by heavy projectile, **Latin American Journal of Solids and Structures**, **3**(1): 26–44.
116. Bilisik, K. and Syduzzaman, Md., Chapter 22: Protective Textiles in Defense and Ballistic Protective Clothing, in Protective Textiles from Natural Resources, Ed: Md. Ibrahim H. Mondal, ELSEVIER LIMITED, Cambridge, MA, USA, June 23, 2022, 689-749 s.
117. Bizão, R.A., Machado, L.D., de Sousa, J.M., Pugno, N.M., Galvão, D.S., 2018, Scale effects on the ballistic penetration of graphene sheets, **Scientific Reports**, **8**(1): 6750.
118. Mylvaganam, K., Zhang, L., 2007, Ballistic resistance capacity of carbon nanotubes, **Nanotechnology**, **18**(47): 475701.
119. Selim, M. S., El-Safty, S. A., Shenashen, M. A., Elmarakbi, A., 2024, Advances in polymer/inorganic nanocomposite fabrics for lightweight and high-strength armor and ballistic-proof materials, **Chemical Engineering Journal**, **493**: 152422.
120. Pandey, J. K., Sharma, S., 2023, Nanocoatings for ballistic applications: A review, **Nanotechnology Reviews**, **12**(1): 150–170.
121. Kausar, A., 2023, Carbon nanotube reinforced composites for ballistic protection: Progress and prospects, **Polymer-Plastics Technology and Materials**, **62**(6): 545–558.
122. Kumar, S., et al., 2020, Experimental study on spall behavior of single and multi-plate composites behind armor subjected to shaped charge, **Journal of Composite Materials**, **54**(17): 2385–2396.
123. Ayers, J. D., 2010. Nanoparticle-Based Corrosion Inhibitors for Aerospace Aluminum, pp. 1–6, Defense Acquisition University Research Conference, 2010, Fort Belvoir, Virginia, USA.
124. Tan, V.B.C., Zeng, X.S., Shim, V.P.W., 2007, Characterization and constitutive modeling of aramid fibers at high strain rates, **International Journal of Impact Engineering**, **35**(11): 1303–1313.
125. Cunniff, P.M., 1996, A semiempirical model for the ballistic impact performance of textile based personnel armor, **Textile Research Journal**, **66**(1): 45–59.
126. Cunniff, P.M., 1999. Dimensionless parameters for optimization of textile-based armour systems, pp. 1303-1310. *18th International Symposium on Ballistics*, 15-19 November 1999, San Antonio.
127. Richardson, M.O.V., Wisheart, M.J., 1996, Review of low-velocity impact properties of composite materials, **Composites Applied Science and Manufacturing**, **27**: 1123–1131.

128. Naveen, V., Padaki, R., Alagirusamy, B.L., et al., 2008, Low velocity impact behavior of textile reinforced composites, **Indian Journal of Fibre & Textile Research**, **33**: 189–202.
129. Freeston, W.D., Claus, W.D., 1973, Strain-wave reflections during ballistic impact of fabric panels, **Textile Research Journal**, **43**: 348–351.
130. Laible, R.C., Ballistic materials and penetration mechanics, Elsevier, Amsterdam, 1980, 73-101 s.
131. Kang, T.J., Lee, S.H., 1994, Effect of stitching on the mechanical and impact properties of woven laminate composite, **Journal of Composite Materials**, **28**: 1574–1587.
132. Mouritz, A.P., Gallagher, J., Goodwin, A.A., 1997, Flexural and interlaminar shear properties of stitched GRP laminates following repeated impacts, **Composites Science and Technology**, **57**: 509–522.
133. Farley, G.L., Dickinson, L.C., 1992, Removal of surface loop from stitched composites can improve compression and compression-after-impact strengths, **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, **11**: 633–642.
134. Wu, E., Wang, J., 1995, Behavior of stitched laminates under in-plane tensile and transverse impact loading, **Journal of Composite Materials**, **29**: 2254–2279.
135. Tan, K.T., Watanabe, N., Iwahori, Y., 2012, Impact damage resistance, response, and mechanisms of laminated composites reinforced by through-thickness stitching, **International Journal of Damage Mechanics**, **21**: 51–80.
136. Chen, G., Li, Z., Kou, C., et al., 2004, Finite element analysis of low velocity impact damage of stitched laminates, **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, **23**: 987–995.
137. Tan, K.T., Watanabe, N., Iwahori, Y., et al., 2012, Understanding effectiveness of stitching in suppression of impact damage: An empirical delamination reduction trend for stitched composites, **Composites Applied Science and Manufacturing**, **43**: 823–832.
138. Tan, K.T., Watanabe, N., Iwahori, Y., 2010, Effect of stitch density and stitch thread thickness on low-velocity impact damage of stitched composites, **Composites Applied Science and Manufacturing**, **41**: 1857–1868.
139. Hosur, M.V., Karim, M.R., Jeelani, S., 2003, Experimental investigations on the response of stitched/unstitched woven S2-glass/SC15 epoxy composites under single and repeated low velocity impact loading, **Composites Structures**, **61**: 89–102.

140. Baucom, J.N., Zikry, M.A., 2005, Low-velocity impact damage progression in woven E-glass composite systems, **Composites Applied Science and Manufacturing**, **36**: 658–664.
141. Hosur, M.V., Karim, M.R., Jeelani, S., 2004, Studies on stitched woven S2 glass/epoxy laminates under low velocity and ballistic impact loading, **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, **23**: 1313–1323.
142. Hosur, M.V., Abraham, A., Jeelani, S., et al., 2001, Studies on the influence of through-the-thickness reinforcement on low velocity and high strain rate response of woven S2-glass/vinyl ester composites, **Journal of Composite Materials**, **35**: 1111–1133.
143. Wu, E., Liao, J., 1994, Impact of unstitched and stitched laminates by line loading, **Journal of Composite Materials**, **28**: 1640–1658.
144. Grujicic, M., Pandurangan, B., Angstadt, D.C., et al., 2007, Ballistic performance optimization of a hybrid carbon-nanotube/E-glass reinforced poly-vinyl-ester-epoxy-matrix composite armor, **Journal of Materials Science**, **42**: 5347–5359.
145. Antonio, F.A., Marcelo, I.S., Neto, A.S., 2007, A study on nanostructured laminated plates behavior under low-velocity impact loadings, **International Journal of Impact Engineering**, **34**: 28–41.
146. Bilisik, K., Yolacan, G., 2013, Experimental characterization of multistitched two-dimensional (2D) woven E-glass/polyester composites under low velocity impact load, **Journal of Composite Materials**, **47**: 2159–2174.
147. Bilisik, K., Yolacan, G., 2014, Low velocity impact characterization of multistitched woven E-glass/polyester nano/micro composites, **Textile Research Journal**, **84**(13): 1411–1427.
148. NASA, 1983. NASA RP 1092: Standard Tests for Toughened Resin Composites, NASA Langley Research Center, Hampton, VA.
149. Suppliers of Advanced Composite Materials Association (SACMA), 1988. SRM 2-88: SACMA Recommended Test Method for CAI Properties of Oriented Fiber-Resin Composites, SACMA, Arlington, VA.
150. AIRBUS TestMethod AITM1-0010: *Determination of Compression Strength After Impact* - Toulouse, France - 2005.
151. BOEING BSS 7260: *Advanced Composite Compression Test* - The Boeing Company - Seattle, WA - 1988.
152. Habib, F.A., 2001, A new method for evaluating the residual compression strength of composites after impact (BAE System), **Composites Structures**, **53**: 309–316.

153. Sanchez-Saez, S., Barbero, E., Zaera, R., Navarro, C., 2005, Compression after impact of thin composite laminates, **Composites Science and Technology**, **65**: 1911–1919.
154. Zachariah, S. A., Dayananda Pai, K., Padmaraj, N. H., Baloor, S. S., 2024. Experimental and numerical investigation on low-velocity impact behaviour of thin hybrid carbon/aramid composite, **Advances in Materials Research**, **13**(5): 391–416.
155. Richardson, M.O.W., Wisheart, M.J., 1996, Review of low-velocity impact properties of composite materials, **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, **27A**: 1123–1131.
156. Li, Y., Jin, Y., Chang, X., Shang, Y., Cai, D., 2024. On Low-Velocity Impact Response and Compression after Impact of Hybrid Woven Composite Laminates, **Coatings**, **14**(8): 986.
157. Ishikawa, T., Sugimoto, S., Matsushima, M., Hayashi, Y., 1995, Some experimental findings in compression after impact (CAI) tests of CF/peek (APC-2) and conventional CF/epoxy flat plates, **Composites Science and Technology**, **55**: 349–363.
158. Reis, L., Freitas, M., 1997, Damage growth analysis of low velocity impacted composite panels, **Composites Structures**, **38**: 509–515.
159. Freitas, M., Reis, L., 1998, Failure mechanisms on composite specimens subjected to compression after impact, **Composites Structures**, **42**: 65–73.
160. Aktas, M., Karakuzu, R., Arman, Y., 2009, Compression after impact behavior of laminated composite plates subjected to low velocity impact in high temperatures, **Composites Structures**, **89**: 77–82.
161. Uda, N., Ono, K., Kunoo, K., 2009, Compression fatigue failure of CFRP laminates with impact damage, **Composites Science and Technology**, **69**: 2308–2314.
162. Yan, H., Oskay, C., Krishnan, A., Xu, L.R., 2010, Compression-after-impact response of woven fiber-reinforced composites, **Composites Science and Technology**, **70**: 2128–2136.
163. Khondker, O.A., Leong, K.H., Herszberg, I., Hamada, H., 2005, Impact and compression-after-impact performance of weft-knitted glass textile composites, **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, **36**: 638–648.
164. Bull, D.J., Scott, A.E., Spearing, S.M., Sinclair, I., 2014, The influence of toughening-particles in CFRPs on low velocity impact damage resistance performance, **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, **58**: 47–55.

165. Zhang, X., Hounslow, L., Grassi, M., 2006, Improvement of low-velocity impact and compression after-impact performance by Z-film pinning, **Composites Science and Technology**, **66**: 2785–2794.
166. Erdogan, G., Bilisik, K., 2018, Compression after low velocity impact (CAI) properties of multi-stitched composites, **Mechanics of Advanced Materials and Structures**, **25**(8): 623–636.
167. Lee, L., Clark, S.R., Mouritz, A.P., Bannister, M.K., Herszberg, I., 2002, Effect of weaving damage on the tensile properties of three-dimensional woven composites, **Composites Structures**, **57**: 405.
168. Beier, U., Fischer, F., Sandler, J.K.V., Altstadt, V., Weimer, C., Buchs, W., 2007, Mechanical performance of carbon fibre-reinforced composites based on stitched preforms, **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, **38**: 1655–1663.
169. Realff, M.L., 1994, Identifying local deformation phenomenon during woven fabric uniaxial tensile loading, **Textile Research Journal**, **64**: 135–141.
170. Realff, M.L., Boyce, M.C., Backer, S., 1997, A micromechanical model of the tensile behavior of woven fabric, **Textile Research Journal**, **67**: 445–459.
171. Freeston, J.W.D., Platt, M.M., Schoppee, M.M., 1967, A study of the frictional properties of textile fibers, **Textile Research Journal**, **37**: 948–955.
172. Pinto, M.A., Chalivendra, V.B., Kim, Y.K., Lewis, A.F., 2013, Effect of surface treatment and Z-axis reinforcement on the interlaminar fracture of jute/epoxy laminated composites, **Engineering Fracture Mechanics**, **114**: 104–114.
173. Velmurugan, R., Solaimurugan, S., 2007, Improvements in Mode I interlaminar fracture toughness and in-plane mechanical properties of stitched glass/polyester composites, **Composites Science and Technology**, **67**: 61–69.
174. Dickinson, L.C., Farley, G.L., Hinders, M.K., 1999, Prediction of effective three-dimensional elastic constants of translaminar reinforced composites, **Journal of Composite Materials**, **33**: 1002–1029.
175. Amuthakkannan, P., Manikandan, V., Jappes, J. T. W., Uthayakumar, M., 2022. Mechanical and ballistic performance of aramid fabric/epoxy composites reinforced with graphene nanoplatelets, **Journal of Industrial Textiles**, **52**(1), 3–24.
176. Tan, K.T., Watanabe, N., Iwahori, Y., 2011, X-ray radiography and micro-computed tomography examination of damage characteristics in stitched composites subjected to impact loading, **Composites Part B: Engineering**, **42**: 874–884.

177. Chen, G., Li, Z., Kou, C., & Gui, L., 2004, Finite element analysis of low-velocity impact damage of stitched laminates. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, **23**(10): 987–995.
178. Xiao, C., Al-Mansour, A.M., Zhengneng, L., Chenghe, K., 2005, Warp and weft directional tensile properties of multistitched woven E-glass/polyester nano composites, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, **24**: 935–944.
179. Guo, P., Chen, X., Gao, X., Song, H., Shen, H., 2007, Fabrication and mechanical properties of well-dispersed multiwalled carbon nanotubes/epoxy composites, *Composites Science and Technology*, **67**: 3331–3337.
180. Tehrani, M., Boroujeni, A.Y., Hartman, T.B., Haugh, T.P., Case, S.W., Al-Haik, M.S., 2013, Mechanical characterization and impact damage assessment of a woven carbon fiber reinforced carbon nanotube-epoxy composite, *Composites Science and Technology*, **75**: 42–48.
181. Jia, X., Zhu, J., Li, W., Chen, X., Yang, X., 2015, Compressive and tensile response of CFRP cylinders induced by transverse impact, *Composites Science and Technology*, **110**: 35–44.
182. Soliman, E., Al-Haik, M., Taha, M.R., 2012, On and off-axis tension behavior of fiber reinforced polymer composites incorporating multi-walled carbon nanotubes, *Journal of Composite Materials*, **46**: 1661–1675.
183. Greef, N.D., Gorbatikh, L., Lomov, S.V., Verpoest, I., 2011, Damage development in woven carbon fiber/epoxy composites modified with carbon nanotubes under tension in the bias direction, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **42**: 1635–1644.
184. Chandradass, J., Kumar, M.R., Velmurugan, R., 2008, Effect of clay dispersion on mechanical, thermal and vibration properties of glass fiber-reinforced vinyl ester composites, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, **27**: 1585–1601.
185. Bozkurt, E., Kaya, E., Tanoğlu, M., 2007, Mechanical and thermal behavior of non-crimp glass fiber reinforced layered clay/epoxy nanocomposites, *Composites Science and Technology*, **67**: 3394–3403.
186. Bilisik, K., Yolacan, G., 2014, Warp and weft directional tensile properties of multistitched woven fabric E-glass/polyester nano composites, *Fibers and Polymers*, **15**: 1051–1061
187. Bilisik, K., Yolacan, G., 2014, Fiber morphology and mechanical properties of multistitched E-glass/polyester composites, *Fiber and Polymers*, **15**: 614–620.
188. Yong, V., Hahn, H.T., 2004, Processing and properties of SiC/vinyl ester nanocomposites, *Nanotechnology*, **15**: 1338–1343.

189. Patnaik, A., Satapathy, A., Mahapatra, S.S., Dash, R.R., 2009, A comparative study on different ceramic fillers affecting mechanical properties of glass–polyester composites, **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, **28**: 1305–1316.
190. Bilisik, K., Erdogan, G., Sapanci, E., 2019, In-plane response of para-aramid/phenolic nanostitched and nanopreg 3D composites under tensile loading, **Polymer Composites**, **40**(4): 1275–1286.
191. Akter, M., Özdemir, H., Bilisik, K., 2024, Graphene nanoplatelets (GNPs)/epoxy nanocomposites: An experimental study on tensile, compressive and thermal properties, **Polymers**, **16**(11): 1483, 1–28.
192. Kendall, K., Cottrell, A.H., 1978, Complexities of compression failure, **Proceedings of the Royal Society A**, **361**: 245–263.
193. Zhang, X., Alloul, O., He, Q., Zhu, J., Verde, M.J., Li, Y., Wei, S., Guo, Z., 2013, Strengthened magnetic epoxy nanocomposites with protruding nanoparticles on the graphene nanosheets, **Polymer**, **54**: 3594–3604.
194. Tang, L.C., Wan, Y.J., Yan, D., Pei, Y.B., Zhao, L., Li, Y.B., Wu, L.B., Jiang, J.X., Lai, G.Q., 2013, The effect of graphene dispersion on the mechanical properties of graphene/epoxy composites, **Carbon**, **60**: 16–27.
195. Kang, Y.A., Kim, M.H., Noh, H.J., Baek, J.B., Jeon, I.Y., 2021, Reinforcement of polystyrene using edge-styrene graphitic nanoplatelets, **Journal of Materials Research and Technology**, **10**: 662–670.
196. Chakraborty, M., Hashmi, M.S.J., 2018, Wonder material graphene: Properties, synthesis and practical applications, **Advanced Materials Processing and Technology**, **4**: 573–602.
197. Chatterjee, S., Nafezarefi, F., Tai, N.H., Schlagenhauf, L., Nüesch, F.A., Chu, B.T.T., 2012, Size and synergy effects of nanofiller hybrids including graphene nanoplatelets and carbon nanotubes in mechanical properties of epoxy composites, **Carbon**, **50**: 5380–5386.
198. Yasmin, A., Daniel, I.M., 2004, Mechanical and thermal properties of graphite platelet/epoxy composites, **Polymer**, **45**: 8211–8219.
199. Prolongo, S.G., Moriche, R., Jiménez-Suárez, A., Sánchez, M., Ureña, A., 2014, Epoxy adhesives modified with graphene for thermal interface materials, **Journal of Adhesion**, **90**: 835–847.
200. Shen, X.J., Liu, Y., Xiao, H.M., Feng, Q.P., Yu, Z.Z., Fu, S.Y., 2012, The reinforcing effect of graphene nanosheets on the cryogenic mechanical properties of epoxy resins, **Composites Science and Technology**, **72**: 1581–1587.
201. Yao, H., Hawkins, S.A., Sue, H.J., 2017, Preparation of epoxy nanocomposites containing well-dispersed graphene nanosheets, **Composites Science and Technology**, **146**: 161–168.

202. Rafiee, M.A., Rafiee, J., Srivastava, I., Wang, Z., Song, H., Yu, Z.Z., Koratkar, N., 2010, Fracture and fatigue in graphene nanocomposites, **Small**, **6**: 179–183.
203. Wan, Y.J., Gong, L.X., Tang, L.C., Wu, L.B., Jiang, J.X., 2014, Mechanical properties of epoxy composites filled with silane-functionalized graphene oxide, **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, **64**: 79–89.
204. Mostovoy, A., Bekeshev, A., Brudnik, S., Yakovlev, A., Shcherbakov, A., Zhanturina, N., Zhumabekova, A., Yakovleva, E., Tseluikin, V., Lopukhova, M., 2024, Studying the structure and properties of epoxy composites modified by original and functionalized with hexamethylenediamine by electrochemically synthesized graphene oxide, **Nanomaterials**, **14**: 602.
205. Li, Z., Wang, R., Young, R.J., Deng, L., Yang, F., Hao, L., Jiao, W., Liu, W., 2013, Control of the functionality of graphene oxide for its application in epoxy nanocomposites, **Polymer**, **54**: 6437–6446.
206. Chandrasekaran, S., Sato, N., Tölle, F., Mülhaupt, R., Fiedler, B., Schulte, K., 2014, Fracture toughness and failure mechanism of graphene based epoxy composites, **Composites Science and Technology**, **97**: 90–99.
207. Bilisik, K., Erdogan, G., Sapanci, E., 2018, Flexural behavior of 3D Para-Aramid/Phenolic/Nano (MWCNT) Composites, **RSC Advances**, **8**(13): 7213–7224.
208. Zhang, Y., Liu, X., Wang, L., Chen, H., Li, J., 2023, Enhanced flexural properties of aramid fiber/epoxy composites by graphene oxide, **Composites Part B: Engineering**, **260**(1): 110123.
209. Kim, S., Lee, J., Park, H., 2024, Mechanical properties of a laminated composite of aramid fabric and epoxy resin: Effect of stacking sequence, **Polymer Composites**, **45**(4): 1234–1245.
210. Halim, M. A., Subramaniyan, S. K., Zaman, I., Viyapuri, R., 2023, Tensile and Flexural Properties of Aramid Fiber Epoxy Composites Manufactured by Vacuum Resin Infusion Process, **Advanced Research in Natural Fibers**, **5**(1): 46–55.
211. Mouritz, A.P., 1996, Flexural properties of stitched GRP laminates, **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, **27**: 525–530.
212. Bilisik, K., Yolacan, G., 2011, Properties of interlaminar shear strength of multi-stitched nanocomposites, **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, **30**: 1065–1074.
213. Wei, Y., Zhang, J., 2008, Characterization of microstructure in stitched unidirectional composite laminates, **Composites: Part A, Applied Science and Manufacturing**, **39**: 815–824.

214. Singh, R., Kumar, A., Sharma, P., 2023, A study on the mechanical performance of Aramid-Epoxy laminated composites with plain and twill woven structure fabric architecture, **Materials Today: Proceedings**, **72**(1): 456–461.
215. Bilisik, K., Karaduman, N., Sapanci, E., 2019, Flexural characterization of 3D prepreg/stitched carbon/epoxy/multiwall carbon nanotube preforms and composites, **Journal of Composite Materials**, **53**(5): 563–577.
216. Chen, G., Li, Z., Kou, C., Gui, L., 2004, Finite element analysis of low-velocity impact damage of stitched laminates, **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, **23**: 987–995.
217. Xiaoquan, C., Al-Mansour, A.M., Zhengneng, L., Chenghe, K., 2005, Off-axis tensile properties of multistitched plain woven E-glass/polyester composites, **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, **24**: 935–947.
218. Wu, Y., Tang, B., Liu, K., Zeng, X., Lu, J., Zhang, T., Shen, X., 2019, Enhanced flexural properties of aramid fiber/epoxy composites by graphene oxide, **Nanotechnology Reviews**, **8**(1): 484–492.
219. Mohamed, M. H., & Bilisik, A. (1995). US Patent 5465760. (PATENT)
220. Zhu, J., Imam, A., Crane, R., Lozano, K., Khabashesku, V.N., Barrera, E.V., 2007, Processing a glass fiber reinforced vinyl ester composite with nanotube enhancement of interlaminar shear strength, **Composites Science and Technology**, **67**: 1509–1517.
221. Salam, M.B.A., Hosur, M.V., Jahan, N., Rahman, M.M., Jeelani, S., 2013, Improvement in mechanical and thermo-mechanical properties of carbon fibre/epoxy composites using carboxyl functionalized multi-walled carbon nanotubes, **Polymers and Polymer Composites**, **21**: 495–507.
222. Sánchez, M., Campo, M., Jiménez-Suárez, A., & Ureña, A., 2013, Effect of the carbon nanotube functionalization on flexural properties of multiscale carbon fiber/epoxy composites manufactured by VARIM, **Composites Part B: Engineering**, **45**: 1613–1619.
223. Kedward, K.T., 1972, On the short beam test method, **Fibre Science and Technology**, **5**: 85–95.
224. Whitney, J.M., Browning, C.E., 1985, On short-beam shear tests for composite materials, **Experimental Mechanics**, **25**: 294–300.
225. Xie, M., Adams, D.F., 1995, Study of three- and four-point shear testing of unidirectional composite materials, **Composites**, **26**: 653–659.
226. Sideridis, E., Papadopoulos, G.A., 2004, Short-beam and three-point-bending tests for the study of shear and flexural properties in unidirectional-fiber-reinforced epoxy composites, **Journal of Applied Polymer Science**, **93**: 63–74.

227. Gurkan, I., Cebeci, H., 2016, An approach to identify complex CNT reinforcement effect on the interlaminar shear strength of prepreg composites by Taguchi method, **Composite Structures**, **141**: 172–178.
228. Bilisik, K., Yolacan, G., 2015, Short beam strength properties of multistitched biaxial woven E-glass/polyester nano composites, **Journal of Industrial Textiles**, **45**: 199–221.
229. Bilisik, K., Erdogan, G., Sapanci, E., 2019, Interlaminar shear properties of nanostitched/nanoprepreg aramid/phenolic composites by short beam method, **Journal of Composite Materials**, **53**(21): 2941–2957.
230. Hearle, J.W.S., 2001, High performance fibers, p. 69. Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC, Cambridge, UK.
231. Nanografi. Boron Carbide (B₄C) Nanopowder. Website: <https://nanografi.com/nanoparticles/boron-carbide-b4c-nanopowder-nanoparticles-purity-99-5-size-40-60-nm-hexagonal/> (Erişim tarihi: Temmuz 2024).
232. Nanothinx. Raw CNTs in powder form. Website: <http://www.nanothinx.com/raw-cnts-in-powder-form/> (Erişim tarihi: Ocak 2024).
233. Lehman, J.H., Terrones, M., Mansfield, E., Hurst, K.E., Meunier, V., 2011, Evaluating the characteristics of multiwall carbon nanotubes: review, **Carbon**, **49**: 2581–2602.
234. Bhattacharya, M., 2016, Polymer nanocomposites—A comparison between carbon nanotubes, graphene, and clay as nanofillers, **Materials**, **9**: 262.
235. US Research Nanomaterials, Inc. Product #479. Web page: <https://www.us-nano.com/inc/sdetail/479> (Date accessed: April 2025).
236. HEXION Teknik bilgi broşürleri, ağustos 2006.
237. Akter, M., Ozdemir, H., Bilisik, K., 2024, Graphene nanoplatelets (GNPs)/epoxy nanocomposites: An experimental study on tensile, compressive and thermal properties, **Polymers**, **16**(11): 1–28.
238. Bilisik, N.E., Erdogan, G., Bilisik, K., 2025, Pull-out properties of nano-processed para-aramid fabric materials in soft ballistic: An experimental analysis, **Applied Sciences**, **15**(5): 2260.
239. Güler, G., 2016. İndirgenmiş yün kumaşın iplik çekme yöntemiyle sürtünme özelliklerinin belirlenmesi. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Kayseri, 453 s.
240. Jung, J.H., Pan, N., Kang, T.J., 2008, Capstan equation including bending rigidity and non-linear frictional behavior, **Mechanism and Machine Theory**, **43**: 661–675.

241. ASTM D3039-14, Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials, West Conshohocken, PA, USA (2014).
242. ASTM D695-15; Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2015.
243. ASTM D790:2010. Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials.
244. ASTM D2344-13:2013. Standard test method for shortbeam strength of polymer matrix composite materials and their laminates.
245. Adams, D.F., Carlsson, L.A., Pipes, R.B., 2003. Experimental characterization of advanced composite materials, 3rd ed. CRC Press, New York.
246. UTEST. Website: <http://www.utest.com.tr> (Erişim tarihi: Nisan 2025).
247. Bilisik, K., Yolacan, G., 2014, Experimental characterization of multistitched two-dimensional (2D) woven E-glass/polyester composites under low velocity impact load, **Journal of Composite Materials**, **48**: 2145–2162.
248. ASTM International, ASTM Standard D7136/D7136M-15: Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.
249. ASTM International, ASTM Standard D7137/D7137M-12: Standard Test Method for Compressive Residual Strength Properties of Damaged Polymer Matrix Composite Plates, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
250. NATO Standardization Agreement (STANAG) 2920: 2015, Procedures for the Evaluation and Classification of Personal Armour Bullet and Fragmentation Threats, 2016.
251. MIL-DTL-46593 Revision B:2006, Detail Specification, Projectile Calibers .22, .30, .50 and 20 mm Fragment- Simulating, US Military Standards, 2006.
252. Ercümen, K.M., Aydın, M., 2024, Ballistic impact performance of aramid fabrics impregnated with single-phase shear thickening fluids (STFs) and SiC additive multi-phase shear thickening fluids, **Polymer Composites**, **45(18)**: 16850–16865.
253. Aydın, M., Soydemir, M., 2021, Ballistic protection performance of a free ceramic particle armor system: An experimental investigation, **Ceramics International**, **47(8)**: 11628–11636.
254. Photron. Website: <http://www.photron.com> (Erişim tarihi: Ocak 2025).
255. ImageJ. Website: <https://imagej.net/software/imagej/> (Erişim tarihi: Aralık 2024).

256. Yip, P.W., 2014. Analysis of two methods for characterization of flame resistant military fabrics and commercial textile fibers: Simultaneous DSC-TGA and Pyrolysis GCMS, Technical Report
257. ASTM D792-91, Standard test methods for density and specific gravity (relative density) of plastics, West Conshohocken, PA, USA (1991).
258. ASTM D3171-99, Standard test methods for constituent content of composite materials, ASTM, West Conshohocken, PA, USA (1999).
259. ASTM D2734-91, Standard test methods for void content of reinforced plastics, West Conshohocken, PA, USA (1991).
260. ISO 7211-3:1984, Textiles, Part 3: Determination of crimp of yarn in fabric, Technical Committee: ISO/TC 38/SC 24, Geneva, Switzerland, 1984.
261. TS 3374 (ISO 1765); Machine Made Textile Floor Coverings-Determination of Thickness. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 1991.
262. TS 251 (ISO 3801:1977); Determination of Mass per Unit Length and Mass per Unit Area of Woven Fabrics. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 1991.
263. EN ISO 7211-2:2024, Textiles - Methods for analysis of woven fabrics construction - Part 2: Determination of number of threads per unit length, International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2024.
264. Cochet, M., Louarn, G., Quillard, S., Boyer, M.I., Buisson, J.P., Lefrant, S., 2000, Theoretical and experimental vibrational study of polyaniline in base forms: non-planar analysis. Part I, **Journal of Raman Spectroscopy**, **31**: 1029–1039.
265. Edwards, H.G.M., Hakiki, S., 1989, Raman spectroscopic studies of Nomex and Kevlar fibres under stress, **British Polymer Journal**, **21**: 505–512.
266. Shebanov, S.M., Novikov, I.K., Pavlikov, A.V., Ananin, O.B., Gerasimov, I.A., 2016, IR and Raman spectra of modern aramid fibers, **Fibre Chemistry**, **48**: 158–164.
267. Cheng, K.N., Lin, Y.H., Lin, G.R., 2013, Single- and double-walled carbon nanotube based saturable absorbers for passive mode-locking of an erbium-doped fiber laser, **Laser Physics**, **23**.
268. Ramgobin, A., Fontaine, G., Bourbigot, S., 2019, Thermal degradation and fire behavior of high performance polymers, **Polymer Reviews**, **59** (1): 55–123.
269. Akato, K., Bhat, G., 2016. High performance fibers from aramid polymers. Elsevier, Amsterdam.

270. Pöhler, S., Järvinen, F., Kallio, V., Silvennoinen, E., 2021, Broadening the Use-Potential of Para-Aramid Fibers with Microwave-Induced Surface Modification for Enhanced Mechanical Adhesion, **Polymers**, **13**(18): 3114.
271. Zhang, Y., Liu, X., Wang, L., Chen, H., Li, J., 2018, Ballistic performance of Kevlar fabric impregnated with nanosilica particles, **Composites Part B: Engineering**, **152**: 152–160.
272. Lord, P.R., Mohamed, M.H., 1992. Weaving: Conversion of yarn to fabric, p. 134. Merrow Publishing Company, Durham, UK.
273. Bilisik, K., Korkmaz, M., 2021, Single and multiple yarn pull-outs on aramid woven fabric structures, **Textile Research Journal**, **81**: 847–864.
274. Syduzzaman, M., Bilisik, K., 2024, Properties of multi-walled carbon nanotubes grown three-dimensional (3D) woven carbon/epoxy multiscale composites: Experimental study, **Materials Today Communications**, **38**: 1–16

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı:	NEDİM ERMAN BİLİŞİK
Uyruğu:	Türkiye (T.C)
Doğum Tarihi ve Yeri:	

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Ege Üniversitesi, Su Ürünleri Mühendisliği-Yetiştiricilik, Bornova-İZMİR (Tez: Makroalg Türlerin Dokuma Kumaşlarda Boyar Özelliklerin Araştırılması)	2021
Lisans	Ege Üniversitesi, Su Ürünleri Mühendisliği, Bornova-İZMİR	2019
Lise	Mustafa Eraslan Lisesi, KAYSERİ	2010

İŞ DENEYİMİ

Yıl	Kurum	Görev
2017	Ertubay Su Ürünleri Üretimi ve Veterinerlik Hizmetleri A.Ş., Urla-İzmir	Stajer

YABANCI DİL

İngilizce

İndeksli yayınlar (WoS)

- 1- Bilisik, N.E., Erdogan, G., Bilisik, K., 2025, Pull-out properties of nano-processed para-aramid fabric materials in soft ballistic: An experimental analysis, **Applied Sciences**, **15(5)**: 2260. <https://doi.org/10.3390/app15052260>
- 2- Bilisik, K., Sahbaz, N., Bilisik, N.E., Bilisik, H.E., 2013, Three Dimensional (3D) Fully Interlaced Woven Preforms for Composites, **Textile Research Journal**, **83(19)**: 2060-2084. DOI: 10.1177/0040517513487791
- 3- Bilisik, K., Sahbaz, N., Bilisik, N.E., Bilisik, H.E., 2014, Three-dimensional circular various weave patterns in woven preform structures, **Textile Research Journal**, **84(6)**: 638-654. DOI: 10.1177/0040517513499437

Kitap bölümü(Uluslararası)

- 1- Kadir Bilisik, Nesrin Sahbaz Karaduman, Nedim Erman Bilisik., Chapter 9: Applications of Braided Structures in Transportation, Book Title: Braided Structures and Composites: Production, Properties, Mechanics and Technical Applications, Ed: Sohel Rana and Raul Figueiro, **CRC PRESS-TAYLOR AND FRANCIS PUBLISHING GROUP**, New York, USA, August 5, 2015, pp. 256-292, ISBN 9781482245004, e-book: 978-1-4822-4501-1.
- 2- Kadir Bilisik, Nesrin Karaduman, Nedim Erman Bilisik., Chapter 3: Fibre Architectures for Composite Applications, Book Title: Fibrous and Textile Materials for Composite Applications, Ed: Raul Figueiro and Sohel Rana, **SPRINGER SCIENCE+BUSINESS MEDIA**, Singapore, 2016, pp. 75-134, ISBN: 978-981-10-0232-8 (Print) 978-981-10-0234-2 (Online), DOI: 10.1007/978-981-10-0234-2.
- 3- Kadir Bilisik, Nesrin Sahbaz Karaduman, Nedim Erman Bilisik, Chapter 4: 3D Fabrics for Technical Textile Applications, Book Title: Non-woven Fabrics, Ed: Prof. Han-Yong Jeon, **INTECH EUROPE (Intech-Open Access Publisher)**, London, UK, 2016, pp. 81-141, ISBN 978-953-51-4586-8, <http://dx.doi.org/10.5772/61224>.
- 4- Kadir Bilisik, Gulhan Erdogan Guler, and Nedim Erman Bilisik Chapter 1: Classification of fibre reinforcement architecture, Book Title: Advanced textile structural composites forming: characterisation, modelling and simulation, Eds: Peng WANG, Nahiene HAMILA, **ELSEVIER LIMITED**, Cambridge, MA, USA, Imprint: **Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering**, August 27, 2025, pp. 3-55, Paperback ISBN: 9780443215780 (print), eBook ISBN: 9780443215797 (online). <https://doi.org/10.1016/C2022-0-02990-1>

Konferans bildirisi(Uluslararası)

- 1- Bilisik, K., Karaduman, N. Ş., Bilisik, H. E., Bilisik, N.E., Three dimensional interlaced woven preforms for composites, **14th AUTEX World Textile Conference**, 26-28 May 2014, Bursa, Turkey, pp. 1-10.

2- Bilisik, K., Karaduman, N., Bilisik, H.E., Bilisik, N.E., Three dimensional circular woven structures for possible artificial organ applications, **EGEMEDITEX 2014**, 2nd International Congress on Healthcare and Medical Textiles, 25-26 September 2014, Cesme-Izmir, Turkey, pp. 89-96.

