

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
SAVUNMA TEKNOLOJİLERİ VE SİSTEMLERİ ANABİLİM DALI
SAVUNMA PLATFORMLARI TEZLİ
YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**NANO-PARÇACIK İHTİVA EDEN KOMPOZİT PLAKALARIN
DÜŞÜK HIZLI ÇARPMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

HAZIRLAYAN

PELİN ALABAY

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ANKARA - 2020

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
SAVUNMA TEKNOLOJİLERİ VE SİSTEMLERİ ANABİLİM DALI
SAVUNMA PLATFORMLARI TEZLİ
YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**NANO-PARÇACIK İHTİVA EDEN KOMPOZİT PLAKALARIN
DÜŞÜK HIZLI ÇARPMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

HAZIRLAYAN

PELİN ALABAY

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEZ DANIŞMANI

PROF. DR. Ö. FARUK ELALDI

ANKARA - 2020

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Savunma Teknolojileri ve Sistemleri Ana Bilim Dalı Savunma Platformları Tezli Yüksek Lisans Programı çerçevesinde Pelin Alabay tarafından hazırlanan bu çalışma, aşağıdaki jüri tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: 21 / 05 / 2020

Tez Adı: Nano-Parçacık İhtiva Eden Kompozit Plakaların Düşük Hızlı Çarpma Davranışının İncelenmesi

Tez Jüri Üyeleri (Unvanı, Adı – Soyadı, Kurumu)

İmza

Prof. Dr. Ö. Faruk Elaldı, Başkent Üniversitesi

.....

Dr. Öğr. Üyesi B. Cenk Balçık, Başkent Üniversitesi

.....

Doç. Dr. A. Hakan Argeşo, Atılım Üniversitesi

.....

ONAY

Ö. Faruk Elaldı

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Tarih: 21 / 05 / 2020

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

Tarih: 21 / 05 /2020

Öğrencinin Adı, Soyadı: Pelin Alabay

Öğrencinin Numarası: 21710249

Anabilim Dalı: Savunma Teknolojileri ve Sistemleri

Programı: Savunma Platformları Tezli Yüksek Lisans Programı

Danışmanı Unvanı/Adı, Soyadı: Prof. Dr. Ö. Faruk Elaldı

Tez Başlığı: **Nano-Parçacık İhtiva eden Kompozit Plakaların Düşük Hızlı Çarpma Davranışının İncelenmesi**

Yukarıda başlığı belirtilen Yüksek Lisans tez çalışmamın; Giriş, Ana Bölümler ve Sonuç Bölümünden oluşan, toplam 82 sayfalık kısmına ilişkin, 21 / 05 / 2020 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından TURNITIN adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orjinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 12'dir.

Uygulanan filtrelemeler:

1. Kaynakça hariç
2. Alıntılar hariç
3. Beş (5) kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

“Başkent Üniversitesi Enstitüleri Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Usul ve Esaslarını” inceledim ve bu uygulama esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarına tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Öğrenci İmzası:.....

Onay

21 / 05 / 2020

Öğrenci Danışmanı Unvan, Adı, Soyadı

Prof. Dr. Ö. Faruk Elaldı

TEŞEKKÜR

Öncelikle gerek bu çalışmanın sonuca ulaştırılmasında benden yardımlarını esirgemeyen, rehberlik ve desteğiyle tezimi yönlendiren, gerekse yüksek lisansım sürecim boyunca her konuda her zaman yardımcı, sabırlı ve yol gösterici olan tez danışmanım saygıdeğer hocam *Prof. Dr. Ö. Faruk ELALDI*'ya en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez düzeneğinin kurulumu ve testlerin gerçekleştirilmesi konularındaki destekleri sebebiyle saygıdeğer hocam *Ali Can*'a gönülden teşekkür ederim.

Son olarak, çalışmalarım boyunca anlayışları ve kesintisiz destekleri için babam *Ercan Alabay*, annem *Gülay Alabay*, kardeşim *Ertan Alabay* ve *Safir Alabay*'a minnettar olduğumu belirtmek isterim.



ÖZET

Pelin ALABAY

NANO-PARÇACIK İHTİVA EDEN KOMPOZİT PLAKALARIN DÜŞÜK HIZLI ÇARPMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Savunma Teknolojileri ve Sistemleri Anabilim Dalı

2020

Çok tabakalı kompozit plakalarda düşük hızlı çarpmalar sonucunda oluşabilecek tabakalar arası ayrışma (delaminasyon) ve penetrasyon/perforasyon gibi olaylarının incelenmesi büyük önem arz etmektedir. Bu tez çalışmasında, aramid takviyeli nano-parçacık içeren epoksi kompozit plakaların düşük hızlı darbe davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Bu maksatla, iki farklı nano-parçacık ile güçlendirilmiş epoksi matriks bazlı kompozit plakaların üretimi esnasında, epoksi reçine içerisine ilave edilen TiC ve ZrC nano-parçacık katkısının kompozit plakaların düşük hızlı çarpma davranışlarına etkileri araştırılmıştır. Bu kapsamda nano-parçacıklar epoksi reçineye ağırlıkça %1'i oranlarında, daha sonrasında bu karışımlara, epoksi sertleştirici 1/6 oranında, ilave edilerek ultrasonik karıştırıcı ile homojenize edilmiştir. Katkısız, ZrC ve TiC nano-parçacık içeren kompozit plakalar, 100 x 100 mm. boyutlarında 7 kat aramid fiber kumaş, nano-parçacık ihtiva eden epoksi reçine, $[0^\circ/45]_7$ şeklinde bir oryantasyon elde edilecek biçimde el yatırma yöntemi ile üretilmiştir. Daha sonra, el yatırma yöntemi ile üretilen kompozit plakaların, sabit bir yükseklikten, sabit bir enerji ile düşürülen impektör yardımıyla düşük hızlı çarpmaya karşı davranışları incelenmiştir. Düşük hızlı darbe testlerinde titanyum nano-parçacık katkılı plakalar, katkısız plakalara oranla % 19 oranında daha az penetrasyon vermiştir. Diğer bir deyişle katkısız plakalara oranla % 19 oranında çarpma/darbeye karşı daha fazla direnç göstermiştir. Buna karşılık zirkonyum nano-parçacık katkılı plakalar ise katkısız olan plakalara oranla düşük hızlı çarpmalara karşı % 4 oranında daha dirençli olmakla beraber, titanyum nano-parçacık katkılı olan plakalara oranla katkısının çarpma direnci açısından daha düşük kaldığı tespit edilmiştir.

ANAHTAR KELİMELEER: Nano-parçacık, ZiC, TiC, aramid kompozit plakalar, düşük hızlı darbe



ABSTRACT

Pelin ALABAY

AN INVESTIGATION ON LOW-VELOCITY IMPACT BEHAVIOR OF COMPOSITE LAMINATES CONTAINING NANO-PARTICLE RESIN SYSTEM

Başkent University, Institute Science and Engineering

Department of Defense Technologies and Systems

2020

Analysis on delamination and penetration/perforation that may occur as a result of the low velocity impact in the multilayer composite structures is of great importance. In this thesis, the low velocity impact behavior of the aramid fiber reinforced epoxy composite plates, containing nano-particles, are studied experimentally. During the production of epoxy based composite plates reinforced with nano-particles, the effects of the TiC and ZrC nano-particle contribution which was added into the epoxy resin on low velocity impact behavior of the composite plates were studied. In the study, nano-particles were added into epoxy resin by 1 % in weight, and then epoxy hardener was added into this mixture by the rate of 1/6 and they were homogenized by means of an ultrasonic mixer. Nano-particle free, ZrC and TiC nano-particle containing composite plates were produced with hand lay-up method in such a way to obtain $[0^\circ/45]_7$ orientation with 7 layers of aramid fiber fabric in dimensions 100 x 100 mm. Then, the behavior of the composite plates produced with hand lay-out method against low velocity impact by means of an impactor dropped from a fixed height with a fixed potential energy were studied. In the low velocity impact tests, plates containing titanium nano-particles yielded 19 % less penetration depth in comparison with particle free plates. In other words, it showed more resistance against the impact by 19 % compared to particle free plates. On the other hand, although plates containing zirconium nano-particles are more resistant to low velocity impacts in comparison with particle free plates by 4 %, but, it has been determined that its contribution in terms of impact resistance remained lower than the plates containing titanium nano-particles.

KEYWORDS: Nano-particles, ZrC, TiC, aramid composite plates, low-velocity impact test



İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEŞEKKÜR.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT.....	iv
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Takviye Elemanı.....	2
1.1.1. Cam takviye elemanı.....	3
1.1.2. Karbon takviye elemanı.....	3
1.1.3. Organik moleküller (aramid) takviye elemanı.....	4
1.2. Matris.....	4
1.2.1. Plastik matris malzemeleri (polimerler / reçineler).....	5
1.2.2. Metal matris malzemeleri.....	6
1.2.3. Yüksek sıcaklık matrisleri.....	7
1.3. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	7
1.3.1. Parçacıklarla güçlendirilmiş kompozit malzemeler.....	7
1.3.2. Dağılım ile sertleştirilmiş kompozit malzemeler.....	7
1.3.3. Liflerle güçlendirilmiş kompozit malzemeler.....	7
1.3.4. Yapısal kompozit malzemeler.....	7
1.3.5. Nano-kompozit malzemeler.....	8
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	9
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	16
3.1. Malzeme.....	16
3.1.1. Aramid elyaf kumaş.....	16
3.1.2. Epoksi reçine.....	17
3.1.3. Sertleştirici.....	18

3.1.4. Peel ply (soyma) kumaş.....	18
3.1.5. Kalıp ayırıcı.....	19
3.1.6. Ayırma (release film) filmi.....	19
3.1.7. Vakum sızdırmazlık bandı – 20 SC (tacky tape).....	20
3.1.8. Kullanılan diğer malzemeler ve işg koruyucu ekipmanlar.....	21
3.1.9. Vakum malzemeleri.....	22
3.1.10. Titanyum karbür (TiC).....	23
3.1.11. Zirkonyum karbür (ZrC).....	24
3.2. Epoksi Reçine ve Kuru Kevlar Kumaş Malzemenin Hazırlanması.....	25
3.3. Kompozit Plakaların Üretimi.....	30
3.3.1. Vakumlama işlemi.....	30
3.3.2. Plaka kesim işlemi.....	31
3.4. Testlerin Yapılması.....	33
3.4.1. Düşük hızlı çarpma deney tertibatı.....	33
3.4.2. Deney tertibatı.....	34
4. DENEYSEL VERİLERİN ANALİZİ.....	35
4.1. Katkısız – Nano-Parçacıksız Plakalar.....	35
4.2. TiC – Nano-Toz Parçacıklı Plakalar.....	38
4.3. ZrC – Nano-Toz Parçacıklı Plakalar.....	42
5. SONUÇ.....	48
KAYNAKLAR.....	49
EKLER	

EK 1: TiC Nano-Parçacıklı Malzemelerin Özellikleri ve Laboratuvar Test Sonuç Raporu

EK 2: ZrC Nano-Parçacıklı Malzemelerin Özellikleri ve Laboratuvar Test Sonuç Raporu

EK 3: Katkısız [A] - Enerji [J] - Zaman [s] Grafikleri

EK 4: Katkısız [A] - Enerji [J] - Yer Değiştirme Z (Göçük) [mm] Grafikleri

EK 5: Katkısız [A] - Kuvvet [N] - Yer Değiştirme Z (Göçük) [mm] Grafikleri

EK 6: Katkısız [A] - Yer Değiştirme Z (Göçük) [mm] - Zaman [s] Grafikleri

EK 7: TiC [B] - Enerji [J] - Zaman [s] Grafikleri

EK 8: TiC [B] - Enerji [J] - Yer Değiştirme Z (Göçük) [mm] Grafikleri

EK 9: TiC [B] - Kuvvet [N] - Yer Değiştirme Z (Göçük) [mm] Grafikleri

EK 10: TiC [B] - Yer Değiştirme Z (Göçük) [mm] - Zaman [s] Grafikleri

EK 11: ZrC [C] - Enerji [J] - Zaman [s] Grafikleri

EK 12: ZrC [C] - Enerji [J] - Yer Değiştirme Z (Göçük) [mm] Grafikleri

EK 13: ZrC [C] - Kuvvet [N] - Yer Değiştirme Z (Göçük) [mm] Grafikleri

EK 14: ZrC [C] - Yer Değiştirme Z (Göçük) [mm] - Zaman [s] Grafikleri



TABLÖLER LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1. MGS Laminasyon Epoksi Reçine L326'nın Özellikleri	17
Tablo 3.2. MGS Laminasyon Epoksi Reçine Sertleştirici LH326'nın Özellikleri	18
Tablo 3.3. Vakum Sızdırmazlık Bandı – 20 SC'nin Özellikleri	20
Tablo 3.4. Titanyum Karbür (TiC)'ün Teknik Özellikleri	23
Tablo 3.5. Zirkonyum Karbür (ZrC)'ün Teknik Özellikleri	24
Tablo 4.1. Nano-Parçacık Katkısız Numunelerden Elde Edilen Veriler	36
Tablo 4.2. Titanyum Karbür (TiC) Nano-Parçacık Katkılı Numunelerden Elde Edilen Veriler	39
Tablo 4.3. Zirkonyum Karbür (ZrC) Nano-Parçacık Katkılı Numunelerden Elde Edilen Veriler	43
Tablo 4.4. Nano-Parçacık Katkılı ve Katkısız Numunelerden Elde Edilen Veriler	47

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1. Kullanılan Materyallerin Ağırlığa Göre Dağılımı.....	1
Şekil 3.1. Aramid (Kevlar) Fiber Kumaş	16
Şekil 3.2. MGS Laminasyon Epoksi Reçine	17
Şekil 3.3 MGS Laminasyon Epoksi Reçine Sertleştiricisi	18
Şekil 3.4. Peel Ply (Soyma) Kumaş.....	19
Şekil 3.5. Kalıp Ayırıcı.....	19
Şekil 3.6. Release Film (Delikli Naylon)	20
Şekil 3.7. Vakum Sızdırmazlık Bandı	20
Şekil 3.8. Kullanılan Diğer Malzemeler ve İSG Koruyucu Ekipmanlar	21
Şekil 3.9. Vakum Battaniyesi	22
Şekil 3.10. Vakum Çıkış Bağlantı Seti Alüminyum.....	22
Şekil 3.11. Vakum İçin Bağlantı Konnektör Seti M/F ve Vakum Hortumu	22
Şekil 3.12. Vakumlama İşlemi	23
Şekil 3.13. Titanyum Karbür Nano-Parçacıklar (TiC)	24
Şekil 3.14. Zirkonyum Karbür Nano-Parçacıklar (ZrC).....	25
Şekil 3.15. Yüzey Temizleme İşlemi.....	25
Şekil 3.16. Kalıp Ayırıcı Uygulaması	26
Şekil 3.17. Fiber Kumaş Kesim İşlemi – 1	26
Şekil 3.18. Fiber Kumaşlar Kesim İşlemi – 2	27
Şekil 3.19. Peel Ply (Soyma) Kumaşların Hazırlanması	27
Şekil 3.20. Delikli Ayırıcı Filmin Hazırlanması	28
Şekil 3.21. Vakum Battaniyesi (sol) ve Vakum Naylonunun Hazırlanması (sağ)	28
Şekil 3.22. Epoksi (sol) ve Sertleştirici (sağ) Karışımlarının Hazırlanması.....	29

Şekil 3.23. Nano-Tozların Hazırlanması	30
Şekil 3.24. Nano-Toz Karışımlarının Hazırlanması	30
Şekil 3.25. Vakumlama İşlemi Öncesi (sol) ve Vakumlama İşlemi Sonrası (sağ).....	31
Şekil 3.26. Plaka Kesim İşlemi.....	32
Şekil 3.27. Su Jeti ile Kesim Sonrası Plakalar.....	32
Şekil 3.28. Düşük Hızlı Çarpma Cihazı (sol) ve Verilerin Aktarıldığı Bilgisayar (sağ)	33
Şekil 3.29. Test Numune Plakalarının Tutuculara Bağlantısı	34
Şekil 3.30. Düşük Hızlı Çarpma Deneyi Kalibrasyon Ayarları	34
Şekil 4.1. Katkısız [A] – Kuvvet [N] – Zaman [s] Grafiği.....	35
Şekil 4.2. Katkısız [A] – Enerji [J] – Zaman [s] Grafiği	37
Şekil 4.3. Katkısız [A] – Yer Değiştirme Z (Göçük) [mm] – Zaman [s] Grafiği.....	38
Şekil 4.4. TiC [B] – Kuvvet [N] – Zaman [s] Grafiği	39
Şekil 4.5. TiC [B] – Enerji [J] – Zaman [s] Grafiği.....	40
Şekil 4.6. TiC [B] – Yer Değiştirme Z (Göçük) [mm] – Zaman [s] Grafiği	42
Şekil 4.7. ZrC [C] – Kuvvet [N] – Zaman [s] Grafiği	43
Şekil 4.8. ZrC [C] – Enerji [J] – Zaman [s] Grafiği	44
Şekil 4.9. ZrC [C] – Yer Değiştirme Z (Göçük) [mm] – Zaman [s] Grafiği.....	46

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

AL2O3	alüminyum oksit
ASTM-D-7136	fiber takviyeli polimer matrisli bir kompozitin düşme ağırlık etkisi olayına karşı hasar direncini ölçmek için test yöntemi
CF	karbon fiber
CO-NH	peptid bağı
FEM	sonlu elemanlar modellemesi
FML	fiber metal laminat
GNP (PG)	grafen nano-platelet
İSG	iş sağlığı ve güvenliği
LS-DYNA3D	sonlu elemanlar kodu
LVDT	doğrusal değişkenli diferansiyel transformatörler (doğrusal yer değiştirme)
LVI	düşük hızlı darbe
MGS L326	MGS laminasyon epoksi reçine
MGS LH326	MGS laminasyon epoksi reçine sertleştiricisi
MROM	modifiye edilmiş karışım metodu
MWCNT	çok duvarlı karbon nano-tüpler
NH2-G	aminoguanine
NM	nano-metre
P3FLD170 170C	ayırma (release film) filmi, delikli naylon
SEM	elektron mikroskobu
SiO2	silisyum dioksit
TiC	grafen katkılı titanyum karbür nano-toz
UV	morötesi, ultraviyole
ZrC	grafen katkılı zirkonyum karbür nano-toz
3DFML	3D fiber metal lamineler
7475 T761	7475 alclad, alüminyum sac

1. GİRİŞ

Günümüz endüstriyel gelişimin en büyük etkenlerinden birisi de malzeme biliminin hızlı ilerlemesidir. Kompozit malzemelerin en çok kullanıldığı alanlardan birisi olan havacılık ve uzay sanayi denince akla ilk gelen malzeme karbon fiber takviyeli kompozit malzemeler olmaktadır. Karbon fiberin yapısı, çelikten 4,5 kat daha hafif olmasına rağmen 3 kat daha dayanıklıdır. Yüksek dayanım ve düşük özgül ağırlık karbon fiberin özellikle havacılık endüstrisinde kullanımının başlıca sebebidir. Örnek verecek olursak, kullanılan materyallerin ağırlığa göre dağılımı Şekil 1.1’de görüldüğü gibidir. [1]



Günümüzde birçok alanda yaygın olarak kullanılan kompozit malzemelerin geçmişi, bilinenin aksine 2. Dünya Savaşı'na veya birkaç yüzyıl gerilere dayanmamaktadır. Kompozit malzemeler binlerce yıldan beri kullanılmakta olup, ilk örnekleri antik çağlara kadar uzanmaktadır. Antik çağlardan beri insanlar kırılğan malzemelerin içerisine hayvansal veya bitkisel kaynaklı lifler ekleyerek bu kırılğan malzemeleri güçlendirmeye çalışmışlardır. Bunun bilinen en yaygın ve eski örneklerinden biri ise kerpiçtir. Çamurun içine karıştırılan saman ve saplar bu malzemeye dayanım vermiş olup insanoğluna sağlam barınaklar yapma imkânı tanımıştır, insanoğlu zaman içinde kompozit malzemelerin getirdiği avantajların farkına varmış ve kullanım alanlarını yaygınlaştırmıştır. Savaş teknolojileri her zaman yeni malzemelerin sık kullanıldığı yerler olmuşlardır. Normal batılı yaylarda sıkça rastlanan, yaygın belirli bir kuvvetten sonra kırılması problemini aşmak isteyen Moğollar, yaygın esneyen kısımlarında farklı lif yönlerine sahip hayvansal tendonlar kullanarak bu sorunu ortadan kaldırmışlardır. Kompozitlerin kullanımıyla ilgili eski bir örnek de Mısır'dan verilebilir. XVIII. Hanedan devrinden kalan farklı renk ve kalınlıktaki amforalar, daha M.Ö. 1600'lü yıllarda Mısır'da ince cam liflerinden yapıldığını ortaya koymaktadır. Her ne kadar

kompozit malzemeler antik çağlardan beri farklı amaçlara yönelik kullanılıyor olsa bile, bugün modern kompozitler olarak adlandırılan kompozitlerin yaygın kullanımının başlangıcı olarak Owens Corning firmasında çalışan bir mühendisin 1930'lu yıllarda tesadüfen keşfettiği fiberglasın, 1937'de Amerika Birleşik Devletleri'nde satışına başlanması olarak gösterilebilir. [2]

Günümüzde kompozit malzemeler birçok farklı sektörde kullanılmakta olup, sürekli olarak geliştirilmekte ve kullanım oranları ise her geçen güne oranla artmaktadır.

Günümüzde kompozit malzemeler yapıları ve özellikleri sayesinde birçok sektörün farklı alanlarda ihtiyaç ve kullanımı bakımından önem arz etmektedir. Kompozit malzemeler, farklı sektörlerde hammadde olarak kullanıldığı gibi imalat yardımcı ekipmanları olarak da kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerin birçok farklı sektörde kullanılmasının nedeni ise birleşenlerinde tek başına iken mevcut olmayan bazı özelliklerin örneğin; hafiflik, yorulma dayanımı, aşınma dayanımı, kırılma tokluğu, esneklik, termal özellikler, ekonomiklik, estetiklik vb. hususların bu bileşenlerden bir kompozit meydana getirildiğinde elde edilmesi olarak tanımlanabilir. Kompozit malzemelerin, parça bütünlüğü, hafiflik, yüksek dayanıklılık, darbe dayanımı ve uzun kullanım ömrü gibi özellikleri, geniş kullanım alanlarında birçok farklı sektörde avantaj sağlamaktadır. Kompozit malzemelerin, dezavantajları olmasına rağmen çelik ve alüminyuma göre birçok avantaja sahiptir. Bu nedenle kompozitler, birçok sanayi alanında kullanılabilecek bir malzemedir.

Kompozit malzeme, iki ya da daha fazla sayıdaki, aynı veya farklı gruptaki malzemelerin en iyi özelliklerini, yeni ve tek bir malzemede toplamak amacıyla, makro-düzeyde birleştirilmesiyle oluşturulan malzemelere denir. [3]

Metal alaşımları gibi çok bileşenli ancak bileşen malzeme kompozisyonu ısıl işlemle değiştirilerek elde edilmiş malzemeler kompozit malzeme sınıfında yer almaz. [4] Her kompozitte genellikle matris ve takviye malzemesi bulunur. Bu malzemeler birbirlerinden farklı fiziksel özelliklere sahipler ve bir araya getirilmeleri ile oluşan kompozit malzeme her ikisinden farklı özelliklere kavuşur. Genellikle takviye (fiber) malzemesi; karbon, cam veya aramid olurken matris malzemesi ise çoğunlukla epoksi, polyester reçineden oluşmaktadır.

1.1. Takviye Elemanı

Genel olarak takviye elemanı taşıyıcı görev üstlenir ve etrafında bulunan matris faz ise onu bir arada tutmaya ve desteklemeye yarar. Takviye elemanları kompozite dayanım, rijitlik ve mekanik özellikleri verir. Termal genleşme katsayısı, iletkenlik ve termal taşınım

gibi özellikleri belirlemede önemli rol alır. Organik moleküller (aramid), karbon, grafit, boron, silisyum karbür (SiC), alüminyum oksit, cam ve polietilen malzemelerin kısa veya uzun devamlı elyaf formunda kullanıldığı ve matris içinde hacimce yaklaşık % 60 oranında pekiştirici işlevi olan malzemelerdir.

Takviye türleri; doğal elyaflar, sentetik organik elyaflar (naylon, aramid), sentetik inorganik elyaflar (cam, karbon, boron vb.)

Başlıca takviye elemanları; cam, karbon, bor, alüminyum oksit (alümina), silisyum karbür, organik moleküller (aramidler).

1.1.1. Cam takviye elemanı

Cam elyafın esasını silis-kum (SiO_2) meydana getirmektedir. Diğer bileşenler ise sodyum, kalsiyum, magnezyum, alüminyum, baryum ve demir gibi elementlerin oksitlerinden oluşur.

Cam takviye elemanın avantajları; hafiflik, stabilite, yüksek mukavemet, ısı yalıtımı (ısı direnci), yüksek yüzeysel boya tutunması, yüksek ses ve darbe emilimi, yanmaya karşı dayanıklılık, esneklik (enine ve boyuna yönde aynı elastikiyet), kimyasal direnci, elektriksel yalıtkanlık, korozyon dayanımı, düşük maliyet.

Cam takviye elemanının dezavantajları; nispeten düşük elastikiyet, yüksek spesifik yoğunluk (2.62 g/cc), nem içermekte, kırılmada azalım, çarpılma, artan abrazyon, yüzey görünüm kalitesinde düşme.

Cam takviye elemanının kullanım alanları; fiberglass olarak da bilinen cam takviyeli plastik, raylı taşımacılık, kablo kanalı, elektrik dağıtım ve pano endüstrisi, inşaat, rüzgâr enerjisi, kimya, kâğıt, otomotiv, atık su projeleri, yüksek titreşim gerektiren uygulamalar.

1.1.2. Karbon takviye elemanı

Grafit karbon atomlarının hegzagonal düzlem katmanında ABABAB sırasıyla düzenli olarak dizilmesiyle oluşur. Tabakalar içinde atomlar arasında kuvvetli kovalent bağlar mevcut iken katmanlar arasında çok zayıf bağlar meydana gelir. Kompozit malzemelerde karbon ve grafit elyaflar, çeşitli şekilde örneğin sürekli lifler ve demetler, kırılmış elyaflar, örgü ve dokunmuş elyaflar, öğütülmüş elyaflar olarak kullanılmaktadır.

Karbon takviye elemanının avantajları; yüksek elastikiyet ve mukavemet, reaktif olmaması (korozyon direnci, yüksek sıcaklık direnci), düşük yoğunluk, yüksek sıcaklığa dayanabilme özellikleri ile bilinir.

Karbon takviye elemanın dezavantajları; yüksek maliyet, metallerle galvanik korozyon oluşturabilmesi ve gevrek olması sayılabilir.

Karbon takviye elemanın kullanım alanları; uzay ve havacılık endüstrisi.

1.1.3. Organik moleküller (aramid) takviye elemanı

Organik moleküllerden olan bu tip kevlar gibi aramid elyaflar takviye elemanı olarak yerini alır. Aramidler, Co-NH grupları ile aromatik karbon halkaları zincirlerinden oluşur. Takviye elemanı olarak tam dizilmiş polimerler önemli bir yer alır. Çok iyi eksenel özellikler vermesi için çekilerek uzatılmasıyla halkalı zincirli dizilme meydana getirilirken radyal özellikleri zayıftır.

Organik moleküller (aramid) takviye elemanın avantajları; düşük özgül yoğunluk (1.47 g/cc), yüksek dayanıklılık (mukavemet ve modülü), nispeten yüksek sıcaklık direnci, iyi dielektrik özellik, azaltılmış termal genleşme katsayısı, yüksek darbe dayanımı, yüksek aşınma dayanımı, yüksek yorulma dayanımı, yüksek kimyasal dayanım.

Organik moleküller (aramid) takviye elemanın dezavantajları; fibrilasyon kolaylığı, düşük kesme performansı, rutubet çekme eğilimi % 6'ya kadar, UV duyarlı, zayıf enine özellikler (sıkıştırma), aşınmaya duyarlı, suya olan ilgisi normal atmosferde % 3 nem veya su olması kimyasal ortamda ve yüksek vakumda uygun değildir.

Organik moleküller (aramid) takviye elemanın kullanım alanları; balistik koruma uygulamaları (askeri kasklar, kurşun geçirmez yelekler vs.), koruyucu giysiler (eldiven, motorsiklet koruma giysileri, avcılık giysileri ve aksesuarları vs.), yelkenliler ve yatlar için yelken direği, hava araçları gövde parçaları, tekne gövdesi, endüstri ve otomotiv uygulamaları için kemer ve hortum, fiber optik ve elektromekanik kablolar, debriyajlarda bulunan sürtünme balatalarında ve fren kampanalarında, yüksek ısı ve basınçlarda kullanılan conta, salmastra vs.

1.2. Matris

Matris malzeme fiberleri bir arada tutar. Böylece fiberlerin tek başına hareket etmesine engel olur. Matris malzeme kompozit malzemeye yüklenen yükü fiberlere transfer eder. Matris malzeme kompozit malzemeye şekil verdiği gibi malzemenin katı durmasını sağlar. Matris malzeme, çevresel faktörlerin vermiş olduğu kimyasal ve fiziksel zararlara karşı kompozit malzemeyi korur. Tokluk gibi hem matris malzemesine hem de takviye elemanına bağlı özelliklere katkı sağlar. Uygulanan kuvvetleri takviye maddeye iletir. Aynı zamanda malzemeyi korur ve takviye madde bu matris maddeye yapıştırılır.

Başlıca matris malzeme cinsleri:

1.2.1. Plastik matris malzemeleri (reçineler / polimerler)

Termosetler; doymamış polyester reçineler, epoksi reçineler, amino reçineler, yüksek sıcaklık reçineleri, fenolik reçineler, silikon polimerler, poliimid, poliüretan reçineler, cynate esters.

Termoplastikler; asetal, poli-etilen, polimed metha akrilik, poli-amids, poli-propilen.

Elastomerler; doğal kauçuk, silikon kauçuk, sentetik kauçuk, kloropren kauçuk, nitril kauçuk.

Termoset malzemelerin avantajları; bozunma derecelerine kadar ısıtıldıklarında dayanıklılık ve şekillerinde büyük bir değişiklik yaşamazlar. Termoset plastikler bu sayede kalıcı bileşenlerin ve büyük, katı şekillerin üretiminde kullanılmaya son derece elverişlidir. Bileşenleri son derece iyi dayanım özelliklerine sahiptir ve sıcaklık artışı karşısında dayanıklılığından bir şey kaybetmez. Termoset plastikler, sahip olduğu birçok özellik sayesinde araç gövdelerindeki elektrik yalıtım malzemeleri gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

Termoset malzemelerin dezavantajları; ısıtıldıklarında yumuşamaz ve ergimezler. Isının yükselmesine karşın ilk katı konumlarını korurlar. Ancak polimer sistemini oluşturan polimer zincirindeki bağlar, ısıtmaya karşı bir sınır değere kadar direnebilir. Belli yüksek sıcaklık değerlerine ulaşıldığında bağlar kopabilir ve termoset malzeme "bozunarak" tersinmez şekilde tepkime verir. Klasik yöntemle şekillendirilemezler.

Termoset malzemelerin uygulama alanları; elektronik çipler, liflerle güçlendirilmiş kompozitler, polimerik kaplamalar, gözlük mercekleri, diş dolguları.

Termoplastik malzemelerin avantajları; hammadde olarak raf ömürleri uzun, geri dönüşüm kabiliyetleri bulunmakta, yüksek süneklik oranına (% 1 - 500) sahiptirler, termoplastik mamuller, işlem sonrası ısıtılarak yeniden şekillendirilebilirler, oda sıcaklığında katı halde bulunan termoplastikler, soğutucu olmaksızın depolanabilirler, sertleşmeleri için organik çözücülere ihtiyaç duyulmaz, üstün kırılma toklukları nedeniyle darbe dayanımları da yüksektir, elektrik yalıtkanlık özellikleri çok iyidir, ısıtıldığında yumuşar yahut erir, soğutulduğunda şekle girer, kaynar ve katılaşıp, defalarca ısıtılabilir ve soğutulabilir, ciddi bir hasar almaz, bu sayede yeniden işlenebilir ve geri dönüştürülebilir.

Termoplastik malzemelerin dezavantajları; çok düşük mukavemete (bilhassa çekme) düşük sertliğe ve düşük rijitliğe sahiptirler. Kompozit malzeme üretiminde matris olarak kullanılmaları zor ve maliyetleri de yüksektir. Oda sıcaklığında işlenmeleri zordur. Bazı

termoplastikleri istenilen şekillere sokabilmek için çözücülere ihtiyaç duyulur. Termoplastik hammaddeleri, termoset malzemelere göre daha pahalıdır. Oda sıcaklığında bile sünme (zamana bağlı şekil değişimi) olabilir. Düşük ergime sıcaklığına sahiptirler.

Termoplastik malzemelerin uygulama alanları; PET (su ve soda şişeleri, polipropilen (ambalaj kapları)), polikarbonat (güvenlik camı, gözlük lensleri), PBT (çocuk oyuncakları), vinil (pencere çerçeveleri), polietilen (bakkal torbaları), PVC (borulama), PEI (uçak kolçakları), naylon (ayakkabı).

Elastomer malzemelerin avantajları; iyi yalıtım, kolay deforme olmaması, yumuşatılıp reçine haline getirildiğinde kolayca şekil verilebilmesi, sertleştiğinde sıcaklık değişimlerinden ve esneme veya sıkışma gibi baskılardan etkilenmemesi, farklı şekiller halinde kalıplanabilen bir bükülebilir plastik malzeme olması, enjeksiyon kalıplama, ekstrüzyon, termoform, şişirme kalıplama vs. gibi konvansiyonel termoplastik süreçler yoluyla kolay dönüşümü, termosetlere karşı düşük enerji maliyeti.

Elastomer malzemelerin dezavantajları; çok maliyetli olması, yükü taşımak için genel yetersizlik, zayıf kimyasal ve ısı direnci, kolayca deforme olabilme, düşük termal kararlılık, yüksek hızlı otomobil lastiklerinde kullanılmaması, yüksek hammadde maliyeti, zayıf kimyasal ve ısı direnci.

Elastomerlerin uygulama alanları; aletler, kalemler, diş fırçaları, traş makinelerinin yumuşak temaslı kısımları, kablo kaplamaları (hoparlör kablolarını ve telefon hatlarını saran yalıtımlar vs.), çatı membranları, otomotiv pencere izolasyonları, araç paspasları, hava yastığı kapakları, enstrüman panel kapakları, spor malzemeleri (tenis ayakkabılarının tabanları vs.), oyuncaklar, kaykay tekerlekleri.

1.2.2. Metal matris malzemeleri

Aluminyum, titanyum, magnezyum, gibi.

Metal matrisli kompozitlerin metallere göre avantajları; mukavemetin yoğunluğa oranı metallere göre daha yüksek olması, yüksek aşınma direnci, daha düşük termal genleşme katsayısı, yüksek yorulma direnci, şekillendirebilme özelliklerinin iyi olması, yüksek elastik modülü, kaynak ve diğer yöntemlerle kolay birleştirilebilmesi.

Metal matrisli kompozitlerin metallere göre dezavantajları; sünekliği işlenen metale göre azalması, üretim maliyetlerinin yüksek olması, fiber takviyesinin söz konusu olduğu durumlarda zor ve karmaşık üretim prosesleri.

Metal matrisli kompozitlerin uygulama alanları; 80'li yılların başında özellikle gelişmiş motorlar, havacılık ve uzay araçları üretimi, jet motorları, fan kanatları, uçak

kanatlarının yüzeyleri ve yapı destekleri, iniş takımı parçaları, bisiklet iskeletleri, golf sopaları, otomotiv endüstrisi.

1.2.3. Yüksek sıcaklık matrisleri

Seramikler.

Yüksek sıcaklık matrislerinin avantajları; mukavemetlerinin çok yüksek olması, ısıl dayanımları yüksek olduğundan, yüksek ısıya maruz yerlerde kullanılması, ergime sıcaklıklarının yüksek olması, elektrik ve ısıl yönden yalıtkan olması.

Yüksek sıcaklık matrislerinin dezavantajları; çok sert ve gevrek yapıya sahip oldukları için kırılğan yapıya sahiptirler. Bu nedenle kullanım alanları sınırlıdır.

Yüksek sıcaklık matrislerinin uygulama alanları; endüstriyel fırınlar (tuğla vs.), elektrik – elektronik, optik sanayi.

1.3. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler 4 ana grupta sınıflandırılabilir:

1.3.1. Parçacıklarla güçlendirilmiş kompozit malzemeler

Daha yumuşak ve sünebilen bir matrisle çevrili, saklanmış, görünmeyen ve düzgün bir şekilde dağılım gösteren sert ve kırılğan bir malzemenin parçacıklarından oluşmuş kompozit malzemedir.

1.3.2. Dağılım ile sertleştirilmiş kompozit malzemeler

Dağılım ve sertleşme ile karakterize edilen kompozit bir malzemenin parçacık boyutu çok küçüktür (çap 100 ile 2500 μ arasında). Normal sıcaklıklarda, bu bileşikler alaşımlardan daha dayanıklı değildir. Sıcaklık arttıkça dirençleri azalır. Sürtünmeye karşı direnci metal ve alaşımlardan daha yüksektir.

1.3.3. Liflerle güçlendirilmiş kompozit malzemeler

Bileşenlerinden biri genellikle fiberglas, kuvars, kevlar (aramid) veya karbon fiber gibi takviye edici bir maddedir.

1.3.4. Yapısal kompozit malzemeler

Hem bileşiklerden hem de basit malzemelerden oluşurlar ve özellikleri temel olarak geometrilerin ve tasarımına bağlıdır. En çok bulunanlar laminatlar ve sandviç panellerdir.

Laminantlar; yapıştırıcı veya başka bir tür bağlayıcı madde ile birleştirilen panellerden oluşur. Her bir tabaka liflerle takviye edilmiş ve baskıya karşı dirençlidir.

Sandviç panel; yüksek mukavemet ve sertliğe sahip, genellikle güçlendirilmiş kompozit veya alüminyum iki dış tabakadan, bal peteği formunda yada dolgu epoksi veya metal gibi daha az yoğun ve daha az dayanıklı ama formundan dolayı daha rijit bir ara malzemedan oluşan malzemelerdir.

1.3.5. Nanokompozit malzemeler

Nano-kompozit, bileşenlerinden birinin 100 nanometreden (nm) daha az olduğu bir, iki veya üç boyutlu ve çok katlı sert bir malzemedir. [5]

Nano-kompozitler takviye maddesi ve matris ile ara yüzey etkileşimleri yönünden diğer geleneksel malzemelere göre baskın özellikleri göstermekte ve içinde dağılmış nano-boyutlu yapılar nedeniyle farklı kuantum reaksiyonları verebilmektedir. [6]

Seramik matris nano-kompozitler; seramik matrise birleştirilmiş yine seramik elyaflarından oluşur. Matris ve lifler, karbon ve karbon lifleri dâhil olmak üzere herhangi bir seramik malzemedan oluşabilir.

Metal matris nano-kompozitler; güçlendirilmiş metal matris kompozitler olarak da tanımlanabilir. Bu tür kompozitler sürekli ve sürekli olmayan takviyeli malzemeler olarak sınıflandırılabilir.

Polimer matris nano-kompozitler; nano-parçacıkların bir polimer matrisle uygun ölçülerde birleştirilmesi nano-ölçekli takviye maddesinin doğal özelliklerinden faydalanarak, malzemenin performansını birçok açıdan ve yüksek seviyede artırabilir. Bu şekilde üretilmiş malzemelere nano-takviyeli polimer kompozitler denilmektedir. [7]

Manyetik nano-kompozitler; dış kaynaklı etkilere tepki verebilen nano-kompozitlere, çoğunlukla bölüm ara yüzleri arasındaki etkileşime bağlı olarak, gelen tepkinin kompozit üzerinde daha geniş ve büyük bir etkisi olabileceği görüşünden dolayı daha fazla önem verilmektedir.

Dış kaynaklı etki, manyetik, elektriksel veya mekanik etki gibi birçok şekilde olabilir. Spesifik olarak, manyetik nano-kompozitler, manyetik malzemenin hem elektriksel hem de manyetik etkilere tepki verme yeteneği nedeniyle, bu alanlardaki uygulamalarda kullanım için faydalıdır. Bir manyetik alanın penetrasyon derinliği de yüksektir, bu da nano-kompozitin etkilendiği alanın artmasına ve dolayısıyla artan bir tepkiye neden olur. [8] [9]

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Benzer çalışma alanları hakkında genel bir bilgi edinmek için dünyanın her yerindeki bilim insanlarının, nano-parçacık, nano-kompozit ve düşük hızlı darbe davranışlarının incelenmesini konu alan çok geniş bir literatür araştırması bulunmaktadır. Benzer çalışma alanları hakkında genel bir bilgi edinmek için yapılan literatür araştırması sonucunda elde edilen bilgiler aşağıda özetlenmiştir.

Halil B. ve arkadaşları (2018) karbon fiber (CF) takviyeli lamine epoksi nano-kompozitlerin düşük hızlı darbe davranışlarına alümina (Al_2O_3) nano-parçacıklarının eklenmesinin etkilerini araştırmışlardır. Bu amaçla, nano-parçacık yüklerinin etkisini gözlemlemek için epoksi reçineye ağırlıkça % 1 ile % 5 arasında değişen farklı miktarlarda Al_2O_3 nano-parçacıkları eklenmiştir. CF destekli epoksi bazlı lamine nano-kompozitler, “Vakum Destekli Reçine İnfüzyon Yöntemi” kullanılarak üretilmiş ve 2 m/s, 2.5 m/s ve 3 m/s darbe hızları altında ASTM-D-7136 standardına göre gerçekleştirilen düşük hızlı darbe (LVI) testleri uygulanmıştır. LVI testinden sonra, elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak kompozitlerdeki hasar oluşumları incelenmiştir. Bu çalışmanın sonuçları Al_2O_3 nano-parçacıklarının eklenmesinin darbe hasarı direncinde önemli bir iyileşme sağladığını göstermiştir. En yüksek hasar direnci ve minimum enerji emilimi, ağırlıkça % 2 Al_2O_3 nano-parçacık yüklemeleri için gözlenmiştir. Sonuç olarak, Al_2O_3 nano-partiküllerinin CF/epoksi kompozitlere eklenmesinin nano-kompozitlerin dinamik tepkisini önemli ölçüde etkilediği gözlemlenmiştir. Bu çalışmada, Al_2O_3 nano-parçacık ilavesinin epoksi/CP kompozitlerinin dinamik tepkisi ve hasar oluşumu üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Ulaşılan temel sonuçlar, kompozitlerin darbe direncinin büyük ölçüde Al_2O_3 nano-parçacık içeriğine bağlı olduğu belirlenmiştir. Ağırlıkça % 1 – 2 Al_2O_3 nano-parçacıklarının ilavesi darbe direncinin artmasına neden olmuştur. Bununla birlikte, darbe direncinin düşmeye başladığı ağırlıkça yaklaşık % 2’lik bir eşik değer olduğu sonucuna varmıştır. Ağırlıkça % 2 Al_2O_3 nano-parçacıklarının ilave edilmesi, hem temas sertliği hem de kompozitlerin bükülme sertliğinin artmasına neden olmuştur. Temas sertliği ve bükülme sertliği değişimlerinde eşik değer varlığının açık bir göstergesi de gözlenmiştir. Al_2O_3 nano-parçacıklarının epoksi içine ilave edilmesinin, enerji emiliminin değişmesine yol açtığı sonucuna varılmıştır. Tüm darbe hızlarında ağırlıkça % 2 Al_2O_3 içeriği için minimum enerji emilimi elde edilmiştir. Mikroskopik incelemeler, Al_2O_3 nano-parçacıklarının ilave edilmesinin interlaminar ve fiber/matris yapışmasının artmasına yol açtığını göstermiştir. Ayrıca epoksi matrisinin

Al₂O₃ nano-parçacıkları tarafından modifiye edildiğinde nano-parçacık ayrışması, çatlak oluşumunun sabitlenmesi ve çatlak yolu sapması gibi sertleşme mekanizmalarının gerçekleştiği tespit edilmiştir. Bu çalışmanın sonucu olarak, modifiye edilmiş nano-kompozitlerin ağırlıkça % 2 Al₂O₃ ile gerçekleştirilmiş özellikleri nedeniyle kompozitlerin dinamik yük altında yapısal malzeme olarak kullanılmak üzere uygun olduğu tespit edilmiştir. [10]

Mahdi H. ve arkadaşları (2015) çok duvarlı karbon nano-tüpler ve kil nano-parçacıkları ile takviye edilmiş cam / epoksiden imal edilmiş nano-kompozit bir kirişin düşük hızlı darbe karşısındaki davranışını araştırmışlardır. “Modifiye Edilmiş Karışım Metodu” (MROM) kullanılarak, matris, nano-parçacıklar veya “Çok Duvarlı Karbon Nano-Tüpler” (MWCNT) ve fiber içeren nano-kompozitlerin mekanik özellikleri belirlenmiş, düşük hızlı darbenin kompozit üzerindeki etkisini analiz etmek için, Euler-Bernoulli ışın teorisi ve Hertz’in temas yasası hareket denklemlerini çözmek için kullanılmıştır. Ayrıca Ritz’in varyasyonel yaklaşım metodu ve dördüncü dereceden Runge-Kutta metodu kullanılarak çözülen zaman alanında bir dizi doğrusal olmayan denklem elde edilmiştir. Nano-parçacıklar veya fiber içeren nano-kompozitlerle takviye gibi farklı parametrelerin maksimum temas kuvveti, enerji emilimi, istifleme sekansı, geometrik boyutlar (örn. Uzunluk, genişlik ve yükseklik) ve çarpma tertibatının ilk hızı karşısındaki dinamik davranışı kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Elde edilen analitik modelden elde edilen veriler “Sonlu Elemanlar Modellemesi” (FEM) ile analiz edilmiştir. Düşük etkili enerjilerde, nano-parçacık etkisinin enerji emiliminde ihmal edilebilir olduğu sonucuna varılmıştır. Bununla birlikte, bu tepki daha yüksek darbe enerjilerinde daha belirgindir. Ayrıca matrise nano-parçacıklar eklendiğinde, darbeli yüklenme sırasında maksimum temas kuvveti artmıştır. Aynı zamanda, nano-parçacık takviyesinin kirişin uzunluğu boyunca kirişin darbe yükü performansı üzerinde büyük etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Kiriş uzunluğundaki artış çarpma sırasında maksimum temas kuvvetini azaltırken, kirişin bükülme sertliğinin artmasına neden olan kiriş genişliğinin ve kalınlığının artması temas kuvvetini arttırmıştır. 1.5 m/s ilk çarpma hızın, darbe merkezinin kuvvet ve yer değiştirme zamanı üzerindeki etkisi araştırılan bir başka parametredir. Sonuçlar, nano-parçacıkların enerji absorpsiyonu ile ilgili davranışlarının yüksek darbe enerjileri açısından daha önemli olduğunu ortaya koymuştur. [11]

Tanjheel H. ve arkadaşları (2017) araştırmalarında nano-kil ve çok duvarlı karbon nano-tüpleri ayrı ayrı eklemenin yanı sıra, ikisinin birden hibrit olarak eklenmesinin karbon

elyaf takviyeli plastik kompozitlerin düşük hızlı darbelere karşı performansına etkilerini de incelemişlerdir. Tipik olarak çoğu çalışmada olduğu gibi bu çalışmada da kullanılan nano-parçacıklar, çok duvarlı karbon nano-tüpler ve nano-killerdir. Bunun için ağırlık olarak % 0,3 çok duvarlı karbon nano-tüp, yine ağırlık olarak % 2 nano-kil ve ağırlık olarak % 0,1 çok duvarlı nano-tüplerin hibritini içeren karbon elyaf takviyeli kompozitler üretilmiştir. Karşılaştırma için referans alınacak numuneler, nano-parçacık içermeyecek şekilde üretilmiştir. Karbon elyaf kompozitlerin hibrid nano-parçacık ile takviye edilerek modifiye edilmesinin etkisini gözlemlemek ve tepkisini çok duvarlı karbon nano-tüpleri ve nano-kil ile modifiye edilenler ile karşılaştırmak için dört farklı tipte örnekten faydalanılmıştır. Akabinde bu örnek kompozit plakalar, 30 J, 40 J ve 50 J enerji seviyelerindeki darbeleri yüklemeye maruz bırakılmışlardır. Örnek plakaların; enerji, yük, yer değiştirme ve hıza karşı gösterdikleri tepkiler ölçülmüş, “Dijital Termografi” tekniğiyle yeni üretilmiş örneklerin hasar alanı incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Bu çalışma sonucunda, nano-takviyeli karbon elyaf kompozitler, referans örneklerle göre daha yüksek yüklere dayanıklılık göstermişlerdir. Çok duvarlı nano-tüpler ve nano-kil ile ayrı ayrı modifiye edilme, karbon elyaf kompozitte sırasıyla % 11 ve % 7,5'e varan bir yük direnci artışı sağlarken, ikisinin hibrit şekilde kullanılması, maksimal yük direncini % 16'ya kadar arttırdığı rapor edilmiştir. Absorbe edilen enerji açısından bakıldığında, tüm enerji seviyeleri için, hibrit nano-partiküllü kompozitlerin diğerlerine oranla en yüksek seviyede olduğu tespit edilmiştir. Aradaki fark, örnek kompozit plakalardan 40 J'lük enerjiye maruz bırakılan örnek kompozit plakada en belirgin şekilde gözlemlenmiştir. Referans karbon elyaf kompozitlere kıyasla hibrit nano-parçacık modifiyeli kompozitler % 32 kadar daha fazla enerji enerjisi absorbe etmişlerdir. Hibrit nano-parçacıklarla modifiye edilmiş kompozitler, 30 J darbede hasarlı alanı azaltmak için en verimli kompozitler olarak tespit edilmişlerdir. Hibrit nano-parçacıklar ile modifiye edilmiş kompozitlerde referans örneklerle göre zarar görmüş alanlar % 80 oranında azalma gösterirken, nano-kil ve çok duvarlı nano-tüplerle ile ayrı ayrı modifiye edilmiş kompozitlerde zarar görmüş alanlar ancak % 30 ve % 50 oranında düşüş göstermiştir. Hasar alanı daha yüksek enerji seviyelerinde daha düşük kalmıştır. Bu çalışmanın sonucunda nano-parçacıkların, karbon elyaf takviyeli kompozitlerin düşük hızlı darbelere karşı tepki davranışını iyileştirdiğini göstermektedir. Nano-kil ve çok duvarlı nano tüplerin birlikte kullanılmasının, yeni modifiye kompozitin bireysel olarak kullanıldığı durumlara nazaran, çok daha iyi tepki yanıtları vermesine yol açan niteliksel iyileştirmelere sinerjik olarak katkıda bulunduğu görülmüştür. [12]

Tatar ve arkadaşları (2019) havacılık uygulamalarında mekanik özellikleri, ısıl stabilitesi ve kimyasal dirençleri nedeniyle, yaygın olarak kullanılan epoksi bazlı elyaf takviyeli kompozitleri, düşük hızlı darbe (LVI) testi ile deneysel olarak incelemişlerdir. Bu kompozitler malzemelerinin kırılkan olması ve zayıf çatlak direnci nedeniyle kriyojenik mühendislik uygulamaları açısından bazı kısıtlamalara da sahiptir. Bu çalışmada kompozitlerdeki matris modifikasyonunun etkisi incelenmiştir. Düşük hızlı darbe testleri, enerji emme kapasitelerini ölçmek için kompozit laminatlar üzerinde oda sıcaklığında 0 °C, -50 °C, -150 °C ve -196 °C (sıvı azot sıcaklığı) de ve ASTM-D-7136 standardına göre 10 J, 20 J ve 30 J enerji değerleri altında darbe testleri gerçekleştirilmiştir. Testlerin sonuçlarına göre epoksi matrisine SiO₂ nano-parçacıkları eklendiğinde temas kuvvetlerinin ve enerji emme kapasitelerinin arttığı görülmüştür. Kriyojenik sıcaklıklarda saf epoksi reçinesi 18,1 J enerjiyi tamamıyla emerken SiO₂ nano-parçacık takviyesi ile elde edilen modifiye epoksi % 24,87 artışla 22,7 J enerjiyi tamamen emmiştir. SiO₂ nano-parçacık takviyesi ağırlıkça % 4 olup ve kompozitler için pik temas kuvvetleri, sırasıyla ortalama 6741 N ve ortalama 6257 N değerlerinde bulunmuştur. Kriyojenik sıcaklıkların, epoksi bazlı cam elyaf kompozitlerin, düşük darbelere karşı gösterdiği tepkileri etkilediği görülmüştür. SiO₂ takviyesi ile elde edilen modifiye matris kompozitlerin, düşük sıcaklıkta düşük hızlı darbelere karşı davranışı da incelendiğinde, kriyojenik sıcaklıkların; düşük darbelere karşı gösterilen tepki üzerinde doğrudan ve önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Çatlama, ayrılma gibi davranışlar düşük sıcaklıklarda artmıştır. Bu nedenle, özellikle düşük sıcaklıktaki malzeme uygulamalarında kullanım koşullarının değerlendirilmesi gerektiği bildirilmiştir. [13]

Eslam M. ve arkadaşları (2012) çok duvarlı karbon nano-tüpler ile güçlendirilmiş ince karbon dokuma kumaş kompozitlerinin, düşük hızlı darbelere karşı tepkilerini incelemişlerdir. Ağırlıkça epoksi cinsinden üç farklı çok duvarlı karbon nano-tüp takviyesini incelemişlerdir. % 0,5, % 1,0 ve % 1,5 oranında çok duvarlı karbon nano-tüpler, takviye edilmiş kompozit plakalar, beş enerji seviyesindeki darbelere maruz bırakılmışlardır. Bunlar 15, 24, 30, 60 ve 120 Joule'lük darbelerdir. Bu darbelerin uygulandığı testte; yer değiştirme, hız ve enerjinin zaman geçmişi tepkileri ölçülmüş ve raporlanmıştır. Ayrıca, her bir darbe enerjisi seviyesiyle ilişkili olan kompozit hasarı, farklı çok duvarlı karbon nano-tüp takviye oranları bazında ölçülmüş ve karşılaştırılmıştır. Çok duvarlı karbon nano-tüp takviyesinin darbe direncini arttırdığı ve dokuma karbon elyaf takviyeli kompozitin plakalardaki hasar boyutunu sınırladığı görülmüştür. % 1,5 çok duvarlı karbon nano-tüp eklenmesi, enerji emiliminde % 50 artışla sonuçlanmıştır. [14]

N. Tsartsaris ve arkadaşları (2011) bir dizi fiber metal laminat (FML) panelinin düşük hızlı darbelere tepkisini, deneysel ve sonlu eleman yöntemleri ile incelemişlerdir. Bu çalışmalarında bu yeni kompozitlerin darbeye karşı dayanıklılık direncini anlamak ve böylece darbelere dayanıklı uçak gövdesi için en uygun tasarımları belirlemeyi amaçlamışlardır. Kullanılan fiber metal laminant paneller, 7475 T761 alüminyum alaşımından ve çapraz katlı konfigürasyonlu ve tek yönlü S2 cam / epoksiden yapılmıştır. Deneysel testler, serbest düşmeli test cihazı kullanılarak yapılmıştır. Kompozit plaka numuneleri, birleştirme kenarı ile kenetlenme tertibatı tarafından sınırlandırılmıştır. Darbe etkisinden kaynaklanan hasarın şekli ve doğası, hem tahribatlı enine kesit mikrofotografisi hem de tahribatsız ultrasonik teknikler kullanılarak değerlendirilmiştir. Testler, fiber metal laminantlarının, lokalize plastik deformasyon yoluyla ve katmanlar arası ara yüzdeki kararsızlık yoluyla enerjiyi emebildiklerini göstermiştir. Özellikle, alüminyum alaşımlı levhanın arka yüzünde, bitişik elyaf takviyeli epoksi tabakasında ve bitişik elyaf takviyeli epoksi tabakası arasında bozulmalar meydana gelmiştir. Sonlu elemanlar kodu LS-DYNA3D, karmaşık hasar yayılımlarını tahmin etmek için düşük hızlı darbenin sayısal simülasyonlarını yapmak için kullanılmıştır. Hesaplanan çarpma sonrası deforme olmuş şekiller ve hasar desenleri, deneysel sonuçlara oldukça yakın bulunmuştur. Ayrıca karmaşık hasar arıza mekanizmasını, darbe sonrası deforme olmuş şekilleri ve bireysel katmanın darbe enerjisini emmedeki rolünü tahmin etmek için kullanılan sonlu eleman modeli, deneysel sonuçlarla oldukça iyi bir korelasyon göstermiştir. [15]

Zohreh ve arkadaşları (2017) grafen nano-platelet (GNP) ile güçlendirilmiş 3D fiber metal laminantların (3DFML) düşük hızlı darbelere olan tepkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. İki tip GNP, saf GNP (PG) ve amino takviyeli GNP (NH₂-G) yani aminoguanine, 3DFML'ların iki ana bileşenini eşleştirmekte kullanılan reçineyi güçlendirmek için kullanılmaktadır. Sonuçlar, ağırlıkça % 1 NH₂-G'nin, hibrid kompozitin darbeye karşı direncinde en büyük artışı sağlayabilecek ve 3DFML'lerde hasar miktarını en aza indirgeyebilecek en uygun içerik olduğunu ortaya koymuştur. Çalışma, örnek olarak kullanılan malzeme gruplarının tümü için kuvvet ve yer değiştirme zamanını, eğilme miktarlarının derinlemesine analizini, kuvvet-yer değiştirme tepkisini, enerji emme kapasitesini ve etkilenen alanların hasar mekanizmalarını kapsamaktadır. Amino takviyeli GNP parçacıklarından (NH₂-G) içeren örneklerin, saf GNP (PG) içerenlere nazaran veya hiç nano-parçacık içermeyen (yani temiz epoksi) ile karşılaştırıldığında daha dirençli tepki gösterdiği belirlenmiştir. Ağırlıkça % 0,5 ve ağırlıkça % 1 PG ve NH₂-G takviyesinin

3DFML'lerin esnekliğini, delinmeye karşı direncini artırdığı görülmüştür. Toplamda, NH₂-G içeren 3DFML'ler daha iyi performans ve enerji emilimi göstermiş, hasar alanı ve hasar derinliği kapsamı minimize edilmiştir. [16]

Shreekant ve arkadaşları (2018) kompozit malzemelerin düşük hızlı darbelere karşı tepkilerinin analizlerini incelemişlerdir. Darbe yükü ve hasar kriterlerine göre düşük darbe hızını ve hasar modunu açıklamışlardır. Çalışmada, kompozit bileşenlerin darbe karşısındaki davranışlarını ve kompozit yapının dayanımını ölçmek için darbe testi metodu uygulanmış ve sonuçlar kompozitin dayanımı açısından açıklanmıştır. Kompozitlerin kararsızlık durumları içsel delaminasyon (kompozit malzemeyi oluşturan tabakaların birbirinden ayrılması), matris kırılması ve fiber kırılması bazında incelenmiştir. Düşük darbe yüklerinden dolayı elyaf ve matrise bağlı iki tip hasar tespit edilmiştir. Darbe için kullanılan impektörün kütleli artışı ve hızının artışı temas kuvvetinde ve dolayısı ile laminant içindeki çarpma bağlı gerilmelerin de artmasına neden olmuştur. Bu nedenle, delaminasyon büyüklüğü kütle ve hızın herhangi birindeki artışla artmaktadır. Hasar görmüş bölgeler görsel, optik veya ultrasonik C-tarama yöntemleri ile incelenmiştir. Sonuç olarak darbe hasarlı kompozit analizinden, kritik matris çatlama kırılma yüzeyinin, lif yönü boyunca normal doğrultuda olduğundan çok daha geniş olduğu görülmüştür. Kompozit malzeme darbe yüküne maruz kaldıktan sonra mukavemetinde azalma görülmüştür. [17]

Elaldi ve arkadaşları (2017) çalışmalarında kompozit malzemelerin kırılma tokluğu özelliklerini geliştirmek maksadıyla epoksi reçineye doğal haloysitlerin nano-tüplerini ilave etmişlerdir. Reçinenin toplam ağırlığına, ağırlık yüzdesi olarak nano-parçacık (kil) eklenmiştir. Testler için farklı ağırlık yüzdeleri, örneğin; % 0, % 2, % 3,5, % 5 gibi dilimler kullanılmıştır. Kullanılan katılaştırıcının ağırlığı, 10 birim epoksi için 3 birim katılaştırıcı oranındadır. Tozun topaklanmaması için, katılaştırıcıya, nano-parçacık yavaşça eklenmiş ve karıştırılmıştır. Düzgün bir çözelti oluşturulduktan sonra, homojenize edilmiştir. Sonuç olarak, reçinenin kalıp içinde yüksek lif içerikli bir preform arasından akması için, üst kalıbın sıkıştırma baskısının sağlanması amacıyla özel bir prosedür geliştirilmiştir. Bu işleme yöntemleriyle % 50 fiber içeriğine sahip laminatlar üretilmiştir. Doğal haloysit (kil) nano-tüplerinin reçinede homojen bir biçimde dağıtılması için teknikler ve yöntemler geliştirilmiştir. Test sonuçları, % 2 haloysit nano-tüplü laminantların, eğilme mukavemeti, kısa kayma mukavemeti, basma ve 90° enine mukavemeti gibi matris ağırlıklı özelliklerini % 10 ile % 15 arttırdığı görülmüştür. 1,5 J ve 2.0 J darbe enerjisine maruz kalan nano-tüplerin % 2'si haloysitli laminant üzerindeki hasar alanının, sırasıyla % 20 ve % 18

oranında azaltılabilir olduğu görölmüştür. % 2 nano-tüplü haloysit laminantların mekanik özelliklerde en iyi performansı gösterdiği görölmüştür. [18]

Literatürden de görüldüğü üzere, kompozit malzemelerde fiber/matris ara yüzünün çeşitli nano-parçacıklar ile iyileştirilerek daha mukavim hale getirilmiş olması bu malzemelerin düşük hızlı darbelere karşı darbe direncini artırdığı ve daha fazla enerji absorbe etmesine olanak sağladığı görölmektedir. Yapılan araştırmalarda cam, karbon ve kevlar gibi farklı fiberler ile takviye edilmiş termoset kompozitlerde, bugüne kadar zirkonium carbide (ZrC) ve titanium carbide (TiC) gibi nano-parçacık ile fiber/matris ara yüzünün iyileştirme çalışmalarına rastlanmamıştır. Bu çalışmada, vücut balistik koruma sistemlerinde yaygın bir biçimde kullanılan kevlar/epoksi kompozit yapılarda ZrC ve TiC nano-parçacıkların darbe (çarpma) direncine katkı sağlayıp, sağlamadığının deneysel olarak araştırılması hedeflenmiştir. Bu maksatla, iyileştirme olup, olmadığının tespiti için, ilk aşamada şahit numune niteliğinde nano-parçacık katkısız referans test plakaları üretilmiştir. İkinci aşamada ise, matris olarak kullanılan epoksi reçine içinde homojen bir biçimde dağıtılmış ZrC (3 nano-metre büyüklüğünde) ve TiC (3 nano-metre büyüklüğünde) nano-parçacık katkılı kevlar kompozit plakalar üretilerek düşük hızlı darbe testleri gerçekleştirilmiş ve nano parçacıkların darbe direncine hangi ölçüde katkı yaptığı değerlendirilmiştir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. Malzeme

Çalışma kapsamında, takviye elemanı olarak vücut balistik koruma sistemlerinde; yaygın bir şekilde kullanılan aramid (kevlar) fiber ve matris olarak epoksi reçine kullanılmasına karar verilmiştir.

3.1.1. Aramid elyaf kumaş

Aramid (kevlar) fiber kumaş 300 gr/m²-twill LS KEVLAR49 veya para-aramid liflerinden imal edilmiş, hafifliğin çok önemli olduğu, yüksek yanal yüklere karşı performanslı kompozit parça imalatlarında kullanılan, 300 gr/m² alan ağırlığına sahip, aramid elyaf kumaş bu çalışma için seçilmiştir. Twill dokuması sayesinde girift şekilli parça imatları için idealdir. Dokunmuş görünümü Şekil 3.1’de görüldüğü gibidir.

Avantajları; yüksek darbe, aşınma ve kırılma direnci sağlar. Yoğunluğu düşüktür. Yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklıdır.

Riskleri; aramid (kevlar) elyaflar kuru halde UV dayanımı düşüktür. Uzun vadede neme karşı hassastır.

Kullanım yerleri; epoksi reçinelerle birlikte, tek başına veya karbon/cam fiber gibi diğer takviye malzemeleriyle hibrit olarak, denizcilik, havacılık, savunma sanayi, modelcilik, otomotive dönük parça imatları için kullanılmaktadır.



Şekil 3.1 Aramid (kevlar) fiber kumaş

3.1.2. Epoksi reçine

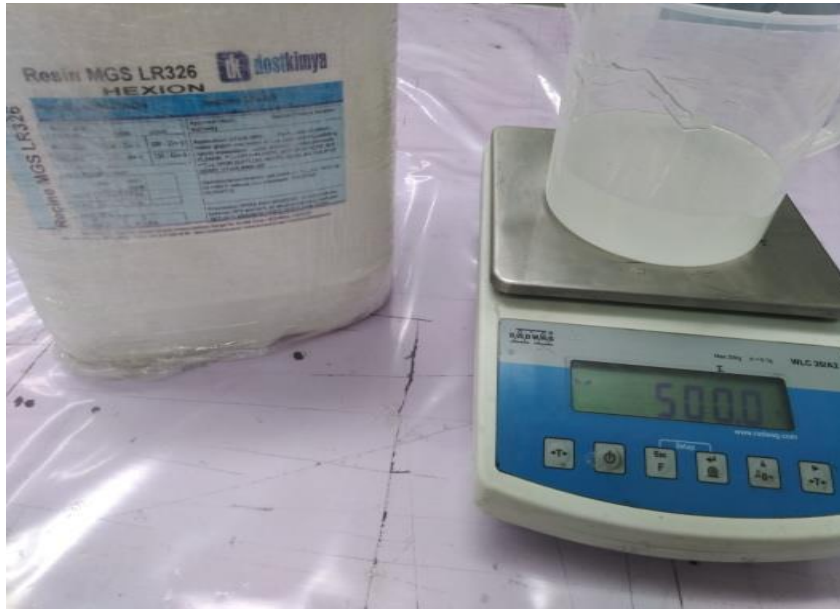
MGS laminasyon epoksi reçine L326. Bir termoset polimeri olan epoksi reçineler; kürleşme sıcaklıklarına göre sınıflandırıldıklarında otoklav işlemi gerektirmeyen durumlarda, düşük kürleşme sıcaklığı olanlardan tercih edilir. MGS laminasyon epoksi reçine L326 epoksi reçinenin özellikleri aşağıda Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1 MGS laminasyon epoksi reçine L326’nın özellikleri

MGS Laminasyon Epoksi Reçine L326
MGS L326 Reçine (1 kg) + H265 Hardener (0,25 kg)
Çalışma Süresi: 5 saat (100 ml karışım 23 °C)
Çalışma Sıcaklığı - 60 °C / + 150 °C
Proses Sıcaklığı + 20 °C / + 50 °C
+ 25 °C / + 35 °C
Yüksek ısı mukavemeti
Çok iyi mekanik ve ısı özellikler
1,5 saatten 5 saate kadar çalışma süresi

Uygulama alanları; yüksek sıcaklık gerektiren uygulamalar, bot, gemi, spor aletleri, kalıp ve genel uygulamalar.

MGS laminasyon epoksi reçine L326 aşağıda Şekil 3.2’de görüldüğü gibidir.



Şekil 3.2 MGS laminasyon epoksi reçine

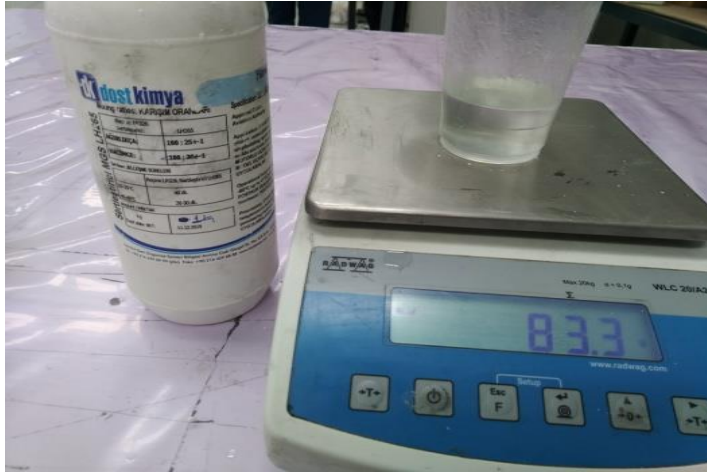
3.1.3. Sertleştirici

MGS laminasyon epoksi reçine sertleştirici LH326'nın özellikleri Tablo 3.2'de verilmiştir. Epoksi reçine karışımının, sert plastik benzeri bir malzemeye dönüşebilmesi için, iki bileşenin karıştırılmasıyla başlayan kimyasal reaksiyon sonucu oluşan ürünlerdir. MGS laminasyon epoksi reçine sertleştiricisi LH326, Şekil 3.3'de gösterilmiştir.

Tablo 3.2 MGS laminasyon epoksi reçine sertleştirici LH326'nın özellikleri

MGS Laminasyon Epoksi Reçine Sertleştirici LH326
Çalışma sıcaklığı - 60 °C / + 150 °C Isıl İşlem Uygulanarak
Proses Sıcaklığı + 20 °C / + 50 °C
+ 25 °C / + 35 °C (tavsiye edilen)
Yüksek ısı mukavemeti
Çok iyi mekanik ve ısıl özellikler
1,5 saatten 5 saate kadar çalışma süresi

Uygulama alanları; yüksek sıcaklık gerektiren uygulamalar, bot, gemi, spor aletleri, kalıp ve genel uygulamalar.



Şekil 3.3 MGS laminasyon epoksi reçine sertleştiricisi

3.1.4. Peel ply (soyma) kumaş

83 gr / m² – Plain en: 152 cm. Kompozit malzeme imalatlarında yüzeyin imalat sonrası istenilen pürüzlülükte olması için soyma/ayırma (peel ply) kumaşı kullanılır. Bu kumaşın pürüzlü dokusu sayesinde, herhangi bir zımpara veya aşındırma işlemine gerek duymadan,

kürleşme sonrası malzeme yüzeyi tozsuz ve istenilen seviyede pürüzlendirilmiş bir şekilde elde edilir. Soyma/ayırma kumaşının sahip olduğu delikli yapı el yatırması veya vakum infüzyon uygulaması sırasında parçada kalabilecek olan hava veya vakumla parçadan uzaklaştırılmasına imkân verdiği için kompozit imalatlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. 83 gr / m²'lik soyma/ayırma kumaşı en yaygın kullanılan üründür, Şekil 3.4.



Şekil 3.4 Peel ply (soyma) kumaş

3.1.5. Kalıp ayırıcı

Kür olmuş plakanın serim yüzeyinden kolay ayrılmasını sağlayan kimyasaldır. Plastik ham maddesinin kalıplara yapışmasını engelleyen, ayırıcı olarak kullanılan bir ürün olup, fırça ile sürülen ve spreyci olan tipleri mevcuttur. Yanıcıdır. 220 - 250 C°'ye kadar dayanıklıdır. Bu çalışmada kullanılan kalıp ayırıcı, Şekil 3.5'de gösterilmiştir.



Şekil 3.5 Kalıp ayırıcı

3.1.6. Ayırma (release film) filmi

P3FLD170 170C / 30 Mic / 150 cm Yeşil / Mavi. Delikli Naylon olarak da bilinen, P31 tipinde (çok delikli), 100B ayırıcı film, 125 C°'ye kadar vakum torbalama veya infüzyon uygulamaları için kullanılır. Birçok reçine sisteminde (polyester, vinilester epoksi ve

fenolik) ayırma yapan polietilen den imal edilmiş 30 mikron kalınlığında ayırıcı film (delikli naylon) dir. Çok delikli olması reçinenin kolaylıkla takviyelere ulaşmasına olanak sağlar, Şekil 3.6.



Şekil 3.6 Release film (delikli naylon)

3.1.7. Vakum sızdırmazlık bandı - 20 SC

Sızdırmazlık bandı “tacky tape” olarak da isimlendirilen, vakum torbalama ve infüzyon işleminde hava geçirmezliğinin sağlanması için vakum filmine ve/veya kalıp yüzeyine yapıştırılarak uygulanır. Vakum sızdırmazlık bandı 20 SC’nin özellikleri Tablo 3.3’de verilmiştir. Vakum torbası kullanarak el yatırması, infüzyon ve prepreg imalatlarında oda sıcaklığında, fırında veya otoklavda kullanabilen yüksek performanslı sızdırmazlık bandı olarak kullanılmaktadır, Şekil 3.7.

Tablo 3.3 Vakum sızdırmazlık bandı – 20 SC’nin özellikleri

Vakum Sızdırmazlık Bandı – 20 SC	
En	12 mm
Kalınlık	3 mm
Rulo boyu	15 metre



Şekil 3.7 Vakum sızdırmazlık bandı

3.1.8. Kullanılan diğer malzemeler ve isg koruyucu ekipmanlar

El yatırma yöntemi ve sonrasında vakumlama için kullanılan, Şekil 3.8’de gösterilen, diğer malzeme ve isg koruyucu ekipmanlar aşağıdaki gibi sıralanmıştır.

- Aramid (Kevlar) Makas
- Ölçü Kabı
- Karıştırma Kabı
- Karıştırma Çubuğu
- Hassas Terazî
- Dijital Kumpas
- Fırça 2’lik
- Koruyu Önlük
- Nitril Eldiven
- Koruyucu Maske
- Koruyucu Gözlük



Şekil 3.8 Kullanılan diğer malzemeler ve İSG koruyucu ekipmanlar

3.1.9. Vakum malzemeleri

Vakum torbası ilk adımda sınırları belirleyen Şekil 3.7’de gösterilen vakum bantları ile yapıştırılır. Bu işlem sırasında, bazı kenarlardan pay bırakılır ve vakum sırasında oluşacak gerilmenin torbaya zarar vermesi engellenmiş olunur. En üste vakum sırasında fazla malzemenin ve hava kabarcıklarının dışarıya çıkması için vakum battaniyesi konur, Şekil 3.9. Daha sonrasında vakum çıkış bağlantı seti, Şekil 3.10, vakum için çabuk bağlantı konnektör seti M/F ve vakum hortumu, Şekil 3.11 bağlantıları tamamlandıktan sonra hazırlanan kalıp vakum makinasına bağlanır, Şekil 3.12. Torba hazırlandıktan sonra vakum makinesi çalıştırılır ve basınç belli bir değere geldikten sonra makine durdurulur. Yaklaşık olarak 10-15 dakika sonra basınç değerinde bir değişme yoksa kalıp, vakumlama işlemine hazır hale gelir.



Şekil 3.9 Vakum battaniyesi



Şekil 3.10 Vakum çıkış bağlantı seti alüminyum



Şekil 3.11 Vakum için bağlantı konnektör seti M/F ve vakum hortumu



Şekil 3.12 Vakumlama işlemi

3.1.10. Titanyum karbür (TiC)

Tungsten karbürüne benzer şekilde son derece sert seramik bir malzemedir. Sodyum klorür kristal yapısı ile siyah toz görünümündedir. Doğada bulunan kristallerinin boyutu 0,1 ile 0,3 mm. arasında değişir, Şekil 3.13. Titanyum Karbür (TiC)'ün teknik özellikleri aşağıda, Tablo 3.4'de verilmiştir. Ayrıca, Titanyum Karbür (TiC) nano-parçacıklı malzemelerin laboratuvar test raporu sonuçları detaylı olarak verilmiştir, bak EK 1.

Tablo 3.4 Titanyum karbür (TiC)'ün teknik özellikleri

Titanyum Karbür (TiC)	
Saflık (%)	99,5 +
Renk	Siyah
Ortalama Parçacık Boyutu (nm)	35 - 55
Özgül Yüzey Alanı (m ² /g)	50
Kitle Yoğunluğu (g/cm ³)	0,08
Gerçek Yoğunluk (g/cm ³)	4,5
Erime Noktası (°C)	3200
Kristal Yapı	Kübik
Zeta Potansiyeli (mV)	25,00
Biçim	Küresele Yakın

Kullanım alanları; titanyum karbür nano-parçacıkları, katkı maddesi ve kaplama olarak kullanılır. Kaplaması, kesici takımların aşınma direnci, nozullar ve aşındırıcı çelik rulmanlar geliştirmesini sağlar.

Depolama koşulları; titanyum karbür nano-parçacıklar vakum altında kapatılmalı ve serin ve kuru bir odada saklanmalıdır. Havaya maruz kalmamalıdır.



Şekil 3.13 Titanyum karbür nano-parçacıklar (TiC)

3.1.11. Zirkonyum karbür (ZrC)

Son derece sert olan ve ateşe dayanıklı seramik bir malzemedir. Yüksek sıcaklıklarda yüksek emisyon ve yüksek akım kapasitesine sahiptir. Kübik kristal yapılı gri metalik bir toz görünümündedir. Korozyona karşı oldukça dayanıklıdır. Aynı zamanda ultra yüksek sıcaklıktaki seramiklerin üyesidir, Şekil 3.14. Zirkonyum Karbür (ZrC)'ün teknik özellikleri aşağıda, Tablo 3.5'de verilmiştir. Ayrıca, Zirkonyum Karbür (ZrC) nano-parçacıklı malzemelerin laboratuvar test raporu sonuçları detaylı olarak verilmiştir, bak EK 2.

Tablo 3.5 Zirkonyum karbür (ZrC)'ün teknik özellikleri

Zirkonyum Karbür (ZrC)	
Saflık (%)	99.5 +
Oksijen İçeriği (%)	< 1,0
Renk	siyah
Ortalama Parçacık Boyutu (nm)	18
Özgül Yüzey Alanı (m ² /g)	25 - 75
Kitle Yoğunluğu (g/cm ³)	0,08
Gerçek Yoğunluk (g/cm ³)	6,80
Zeta Potansiyeli (mV)	-23,90
Kristal Yapı	Kübik

Kullanım alanları; zirkonyum karbür nano-parçacıklar, yüksek sertliğe, yüksek termal iletkenliğe, iyi oksidasyon direncine ve tokluğa sahiptir. Tekstil endüstrisinde naylon, elyaf ve sert alaşımlı termostat tekstil yapımında kullanılır. Polimer nano-kompozitler,

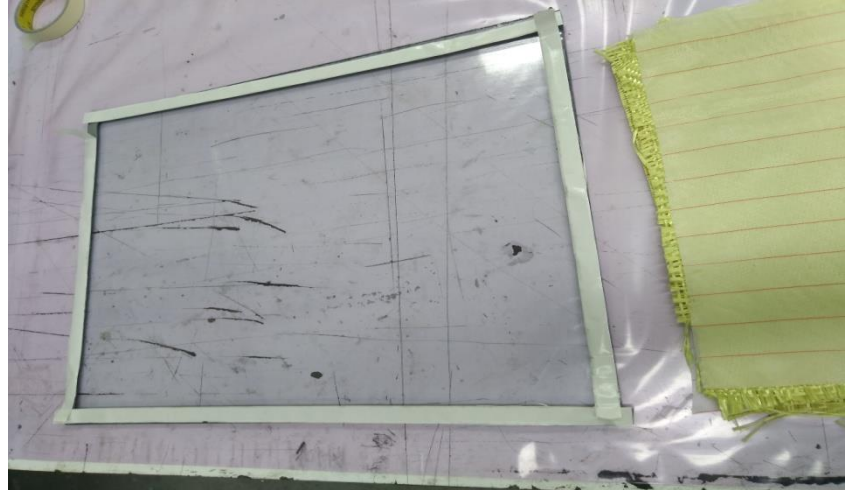
seramik ve metal matris gibi kompozit malzemelerde de kullanılır. Zirkonyum karbür nano-parçacıkları metalürji, kimya ve havacılık endüstrisinde nano-yapılı parçalarda da kullanılır. Aşınmaya dayanıklı olması gereken matkaplar ve diğer aletlerde de uygulama alanına sahiptir.



Şekil 3.14 Zirkonyum karbür nano-parçacıklar (ZrC)

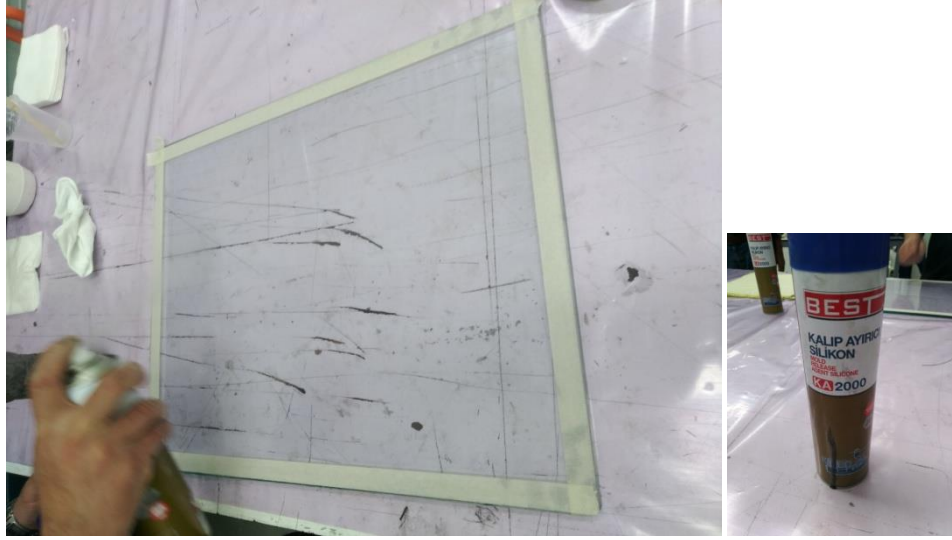
3.2. Epoksi reçine ve kuru kevlar kumaş malzemenin hazırlanması

Serimin yapılacağı yüzey izopropil alkol ile üç kez silinerek yağ ve tozdan arındırılmıştır. Bu sayede daha düzgün ve temiz bir serim yüzeyi elde edilmiştir, Şekil 3.15.



Şekil 3.15 Yüzey temizleme işlemi

Temizlenmiş serim yüzeyine kalıp ayırıcı uygulanmıştır. Bu sayede kürleşme sonrasında plakanın serim yüzeyine yapışması önlenmiştir, Şekil 3.16.



Şekil 3.16 Kalıp ayırıcı uygulaması

El yatırma yöntemi ile imalatı yapılacak olan 3 farklı kompozit malzemenin hazırlanması için öncelikle kuru kevlar fiber kumaşlar Şekil 3.17 ve Şekil 3.18’de gösterildiği gibi 300 x 300 mm. boyutlarında parçalar halinde kesilmiştir.

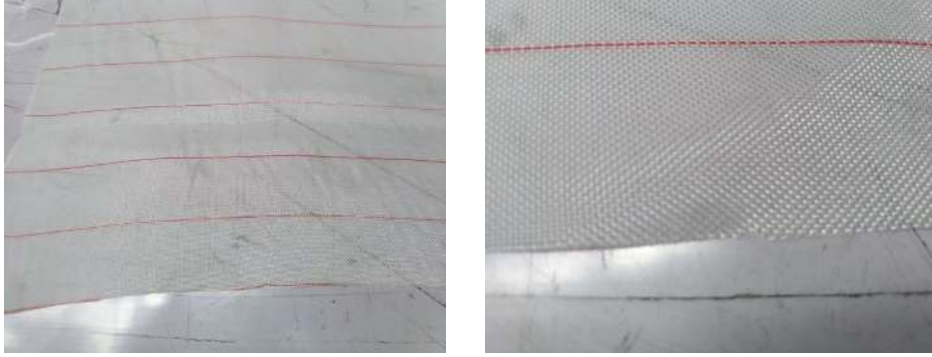


Şekil 3.17 Fiber kumaş kesim işlemi – 1



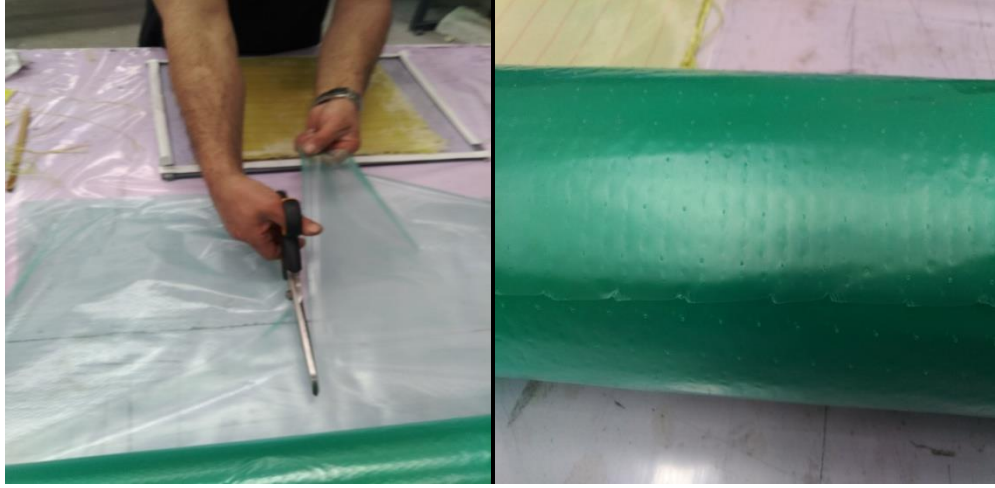
Şekil 3.18 Fiber kumaşlar kesim işlemi - 2

Daha sonra kalıp yüzeyinden rahat bir şekilde ayrılması ve pürüzsüz olması ve için her 3 farklı kompozit numunenin alt ve üst kısımları için peel ply (soyma) kumaşlar 300 x 300 mm.'lik parçalar halinde kesilmiş ve hazırlanan katmanların üzerine serilmiştir, Şekil 3.19.



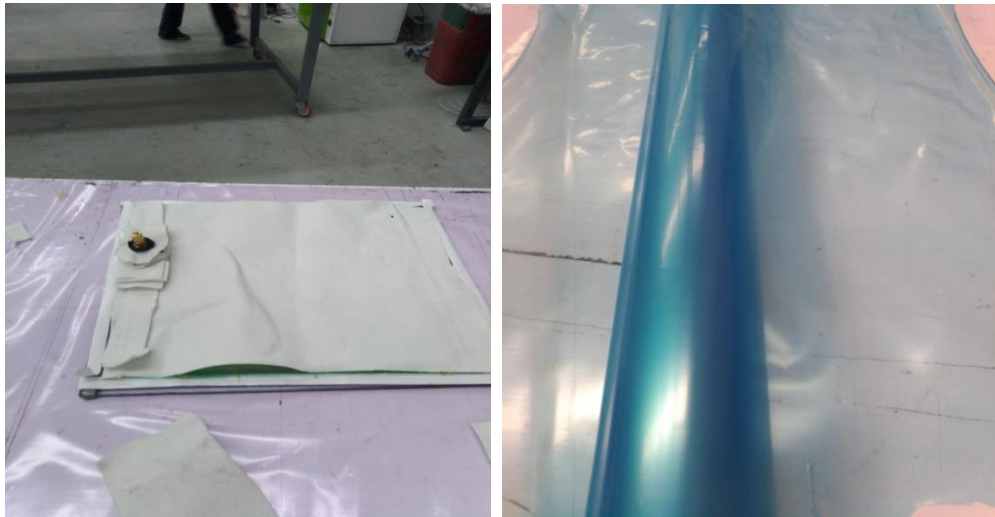
Şekil 3.19 Peel ply (soyma) kumaşların hazırlanması

Delikli naylon olarak da bilinen ayırıcı (release) film, vakumlama işlemi sırasında fazla epoksi reçinenin dışarıya alınmasını sağlamak maksadıyla 450 x 450 mm.'lik parçalar halinde kesilerek vakum naylonu öncesinde katmanların en üst kısmına gelecek biçimde yerleştirilmiştir. Delikli ayırıcı filmin hazırlanışı Şekil 3.20'de gösterilmiştir.



Şekil 3.20 Delikli ayırıcı filmin hazırlanması

Vakum battaniyesi, vakumlama işlemi sırasında epoksi reçinenin içerisinde oluşan fazla hava-gaz kabarcıklarının ve fazla epoksi reçinenin dışarı atılmasını sağlamak için 550 x 550 mm.'lik parçalar halinde kesilerek katmanların üstüne serilmiştir. Daha sonrasında vakumlama işlemi için 550 x 550 mm.'lik boyutlarda kesilmiş vakum naylonu tüm katmanların üstüne serilerek kenarlarından sızdırmazlık bantı ile birleştirilecek biçimde vakumlamaya hazır hale getirilmiştir, Şekil 3.21.

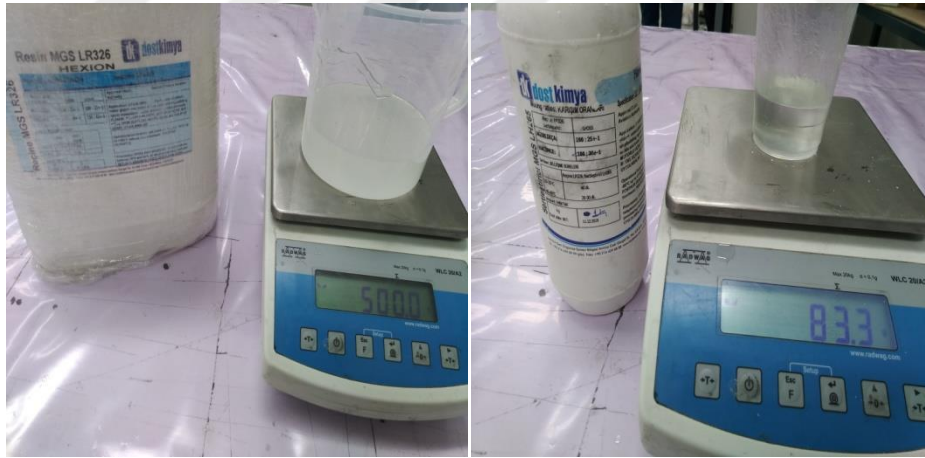


Şekil 3.21 Vakum battaniyesi (sol) ve vakum naylonunun hazırlanması (sağ)

Plakaların üretiminde matris olarak kullanılmak üzere epoksi reçine üç farklı kombinasyonda hazırlanmıştır.

1. Epoksi + sertleştirici
2. Epoksi + sertleştirici + ZrC nano-parçacık
3. Epoksi + sertleştirici + TiC nano-parçacık

Her 3 tip kompozit plakanın hazırlanmasında, 7 katman ($0^{\circ}/90^{\circ}$ açılarında örülmüş) aramid fiber kuru kumaş kullanılmıştır. Epoksi sertleştirici 500 ml. epoksi içerisine 1/6 oranında olacak biçimde, Şekil 3.22, 83,3 ml. olarak katılmış olup, nano-parçacık karıştırılan 2 tip plaka işleminde ise, nano-parçacıklar epoksi miktarının %1'i kadar (8,3 gr.) karışıma, Şekil 3.23 sağda, ilave edilmiştir. ZrC ve TiC nano-parçacık ilave edilen 2 farklı plaka işleminde, Şekil 3.24'de görüldüğü gibi, nano-parçacıkların epoksi içerisinde topaklanma yapmaması için 2 saat boyunca bir karıştırıcı cihazla karıştırılmıştır. 2 saat sonrasında karışımın içerisine sertleştirici katılmış olup, elle sürüm öncesi epoksi + sertleştirici + nano-toz karışım işlemi, sertleştiricinin karışıma eklenmesinden dolayı; malzemenin reaksiyona uğrayıp katılaşmaması için, karışıma 10 dakika daha devam ettirilmiş olup, daha sonrasında karışım, aramid fiber kumaşa fırça ile sürülmüştür.



Şekil 3.22 Epoksi (sol) ve sertleştirici (sağ) karışımlarının hazırlanması



Şekil 3.23 Nano-tozların hazırlanması



Şekil 3.24 Nano-toz karışımlarının hazırlanması

3.3. Kompozit Plakaların Üretimi

3.3.1. Vakumlama işlemi

Vakumlama yapılacak cam yüzeyin üzeri temizlendikten sonra, cam yüzeyin tüm kenar çevresi vakum bandıyla bantlanmış olup, kürlleme işlemi sonrası plakanın kalıptan kolay ayrılması için cam yüzeye, öncelikle kalıp ayırıcı sürülmüştür. İşlemin en alt katına ise soyma naylonu (peel ply) serilmiş olup, daha sonrasında 300 x 300 mm. ölçülerinde kesilmiş olan 7 adet kevlar kumaş, $[0^\circ/45^\circ]_7$ şeklinde serilerek, nano-parçacık içermeyen reçine ile ve iki ayrı nano-parçacık ihtiva eden reçine karışımı, ilgili plaka üretimlerinde

katlar arasına fırça yardımıyla sürülmüştür. Her iki katta bir 10’ar dakikalık ara vakumlama işlemi yapılmış olup, katlar arasında kalan hava kabarcıkları alınmış olup, işlem Şekil 3.25 solda görüldüğü gibidir. Tüm epoksi emdirme ve ara vakum işlemleri bittikten sonra, en üst tabakaya soyma naylonu serilmiştir. Fazla reçinenin vakum yoluyla dışarı alınmasına izin veren delikli yeşil naylon, onun üzerine de fazla reçineyi emmek için kullanılan battaniye ve vakum bağlantı ünitesi ve en üstte de kalacak biçimde mavi vakum naylonu serilerek, serim yapılan cam yüzeyin tüm kenarları sızdırmazlık bantı ile bantlanarak 24 saat vakumlama işlemine bırakılmıştır, Şekil 3.25 sağda görüldüğü gibidir.



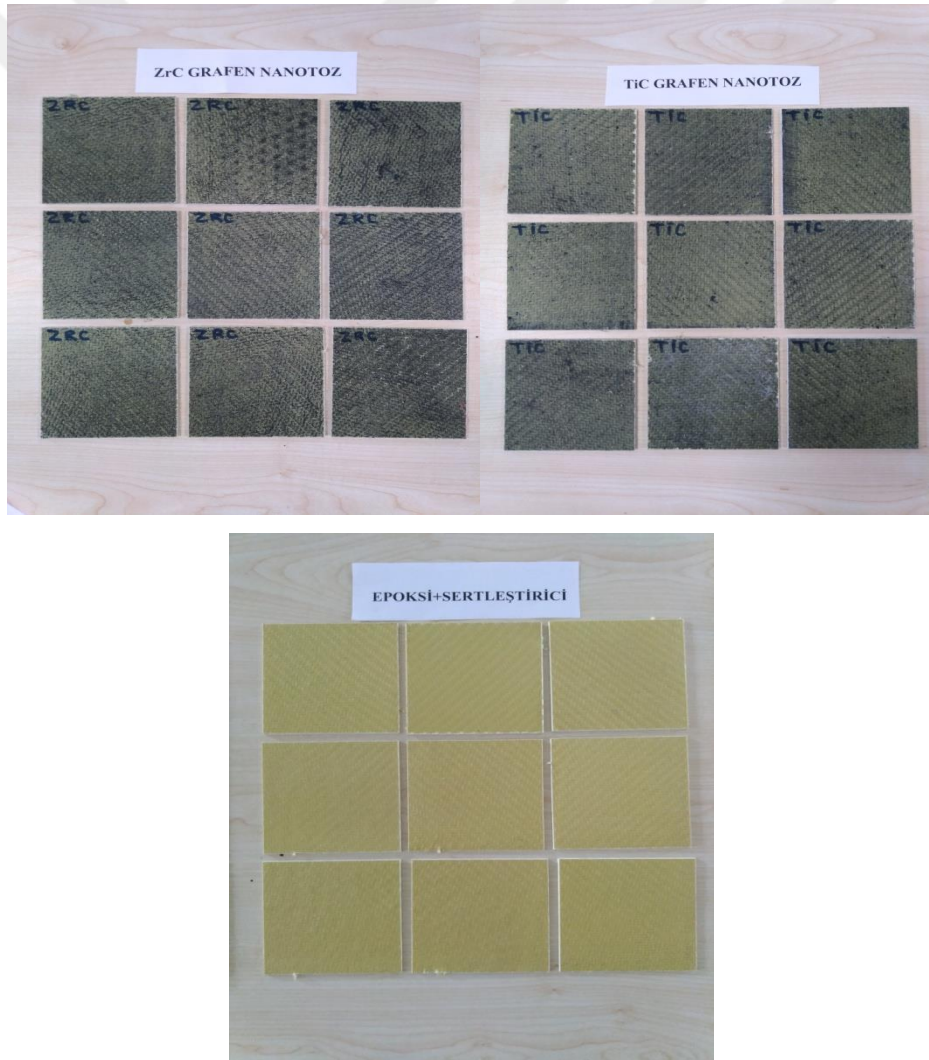
Şekil 3.25 Vakumlama işlemi öncesi (sol) ve vakumlama işlemi sonrası (sağ)

3.3.2. Plaka kesim işlemi

El yatırma yöntemi ile üretilmiş olan 300 x 300 mm. boyutlarında, 3 adet plaka, CNC su jeti ile Şekil 3.26’de görüldüğü gibi, 100 x 100 mm ebatlarında test numuneleri halinde kesilmiş olup, her tip plakadan 9’ar adet test numunesi, düşük hızlı darbe deneyi için hazır hale getirilmiştir, Şekil 3.27.



Şekil 3.26 Plaka kesim işlemi



Şekil 3.27 Su jeti ile kesim sonrası plakalar

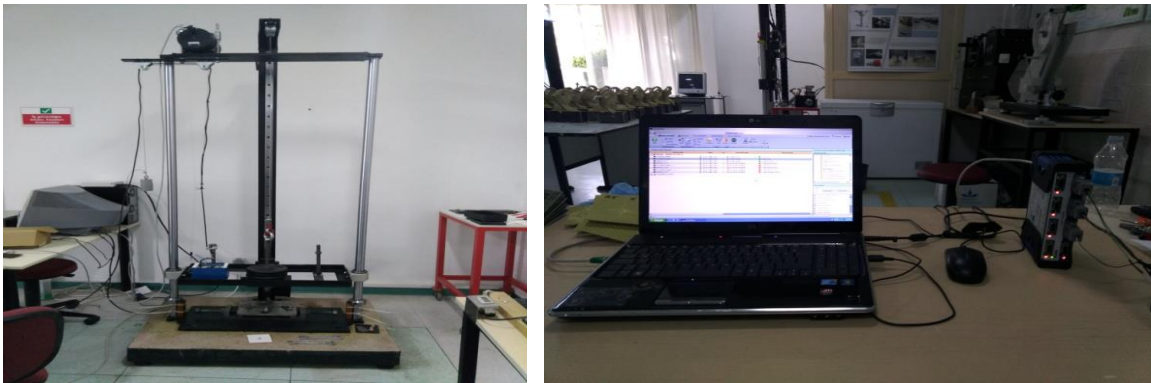
3.4. Testlerin Yapılması

3.4.1. Düşük hızlı çarpma deney tertibatı

Enerjisi düşük olan darbeler (1 - 5 J) düşük hızlı darbeler olarak adlandırılırlar. Bu tür darbelerde çarpma hızı 1 – 10 m/s arasında değişmektedir. Düşük hızlı darbeler, oluşan hasar bakımından matris kırılması, delaminasyon oluşumu ve fiber kopmalarının görüldüğü darbelerdir. Yüksek hızdaki darbeler ise çarpan cismin kompozit malzemeye tamamen nüfuziyetinin söz konusu olduğu darbe türüdür.

Bu testlerde kullanılan düşük hızlı test darbe cihazı maksimum 7 m/s hızında istenilen değişik ağırlık yüklerinde ve ön gerilme uygulanacak şekilde tasarlanmıştır. 7 m/s'lik hız sınırı düşük darbeler için öngörülen hız olduğundan, düşme hızı ve 2 metrelik bir düşme yüksekliği bu testler için yeterli bulunmuştur.

Düşük hızlı test darbe cihazı dört ana bölümden oluşmaktadır. Bunlar; beton kaide, numunenin bağlandığı tabla, yatakların hareket ettiği düşey miller ve sensörlerdir. Cihazda 3 çeşit sensör mevcuttur. Yük hücresi, pozisyon ve hızölçer (LVDT) sensörleri bulunmaktadır. Düşük hızlı darbe test cihazının genel görünümü, Şekil 3.28 soldaki gibidir. Ağırlık düşürme kulesinde, vurucu uç ve ağırlık, kule direklerine düşey kaymalı rulmanlar ile yataklanmıştır. Ağırlık ile vurucu uç arasında kuvvet sensörü (yük hücresi) monte edilmiş olup darbe oluşumunda verileri bilgisayara aktarmaktadır, Şekil 3.28 sağdaki gibidir. Sensörden alınan verileri gerekli grafiklere dönüştürmek amacı ile Catman programı kullanılmaktadır. Düşük hızlı darbe cihazı, mekanik olarak bir dişli ile ağırlığı yukarı kaldırılmakta ve mekanik bir start butonu ile serbest düşme sağlanmaktadır.



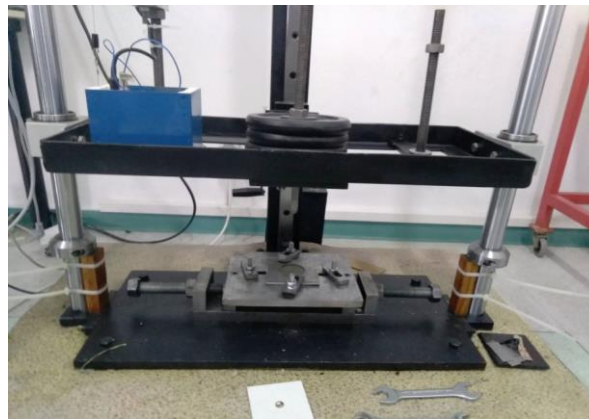
Şekil 3.28 Düşük hızlı çarpma cihazı (sol) ve verilerin aktarıldığı bilgisayar (sağ)

3.4.2. Deneyin yapılışı

Deneylerde vurucu ucun tam olarak numunenin merkezine etki ettirilmesi hasar oluşumu açısından önemlidir. Bu sebeple, test numune plakaları merkezlenerek tutucular ile bağlanmıştır, Şekil 3.29. Sistemin kalibrasyonunu yapmak için kontrol ünitesinin çalıştırılıp, yarı küresel geometriye sahip vurucu uç numuneye temas ettirilerek kalibrasyon işlemi başlatılmıştır. Kalibrasyon işlemi bittikten sonra 20,5 kg'lık kütle, 200 mm.'lik yüksekliğe çekilmiş olup aynı anda kalibrasyon ayarları kontrol sisteminden kaydedilmiştir, Şekil 3.30. Darbe anında çalışması gereken bütün devreler gözle kontrol edilerek, kontrol sisteminden kütle bekleniyor mesajı geldiği anda Catman programından deney başlatılmıştır. Her test numunesinin testinde vurucu uca bağlı yük hücresinden test plakasına çarptığı andan itibaren kuvvet, kayar siteme bağlı LVDT senyöründen ise vurucu ucun pozisyonu ve hızı zamana bağlı biçimde ölçülerek sistem bilgisayarında veri olarak kaydedilmiştir. Bu veriler kullanılarak enerji-zaman, kuvvet-zaman ve yer değiştirme (pozisyon)-zaman grafikleri çizdirilmiştir.



Şekil 3.29 Test numune plakalarının tutuculara bağlantısı



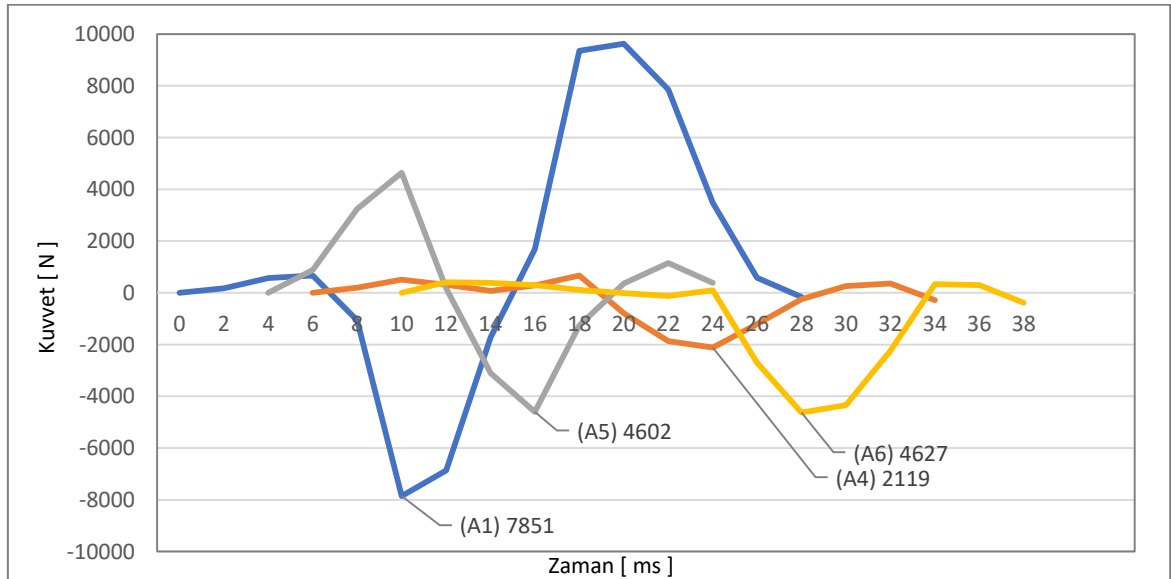
Şekil 3.30 Düşük hızlı çarpma deneyi kalibrasyon ayarları

4. DENEYSEL VERİLERİN ANALİZİ

3 farklı kompozit plaka; 2 farklı nano-parçacık içeren ve 1 katkısız reçineden imal edilmiş aramid elyaf takviyeli kompozit test numuneleri üzerinde yapılan düşük hızlı çarpma deneyleri sonucunda aşağıdaki veriler elde edilmiştir. Çarpma anında ulaşılan en yüksek enerji değerini bulmak için; LVDT sensöründen alınan çarpma anındaki hız kullanılarak, kinetik enerji hesap edilmiş, böylelikle sürtünmeden kaynaklı enerji kayıpları dikkate alınarak çarpma anındaki enerji net olarak hesaplanabilmektedir. Diğer yandan penetrasyon derinliğini bulmak için, yer değiştirme-zaman grafikleri kullanılmış ve yer değiştirme verisinin sıfır değerini geçtikten sonraki ulaştığı en yüksek değer, penetrasyonda ulaşılan en yüksek değer olarak kabul edilmiştir. Söz konusu sıfır noktası, vurucu ucun test numunesine temas ettiği andaki pozisyon değeri, (veri sıralamasında değerin sıfır olduğu an) olarak alınmıştır.

4.1. Katkısız - Nano Parçacıksız Plakalar

Nano-parçacık ihtiva eden kompozit plakaların düşük hızlı darbe dayanımına etkisini inceleyebilmek için; epoksi reçine içine nano-parçacık katılmayan referans test numuneleri öncelikle test edilmiş, kuvvet-zaman, enerji-zaman ve yer değiştirme (penetrasyon)-zaman grafikleri elde edilmiş olup Şekil 4.1, Şekil 4.2, ve Şekil 4.3’de verilmiştir. Bu grafiklerden elde edilen maksimum değerler Tablo 4.1’de sunulmuştur.



Şekil 4.1 Katkısız [A] – Kuvvet [N] – Zaman [ms] Grafiği

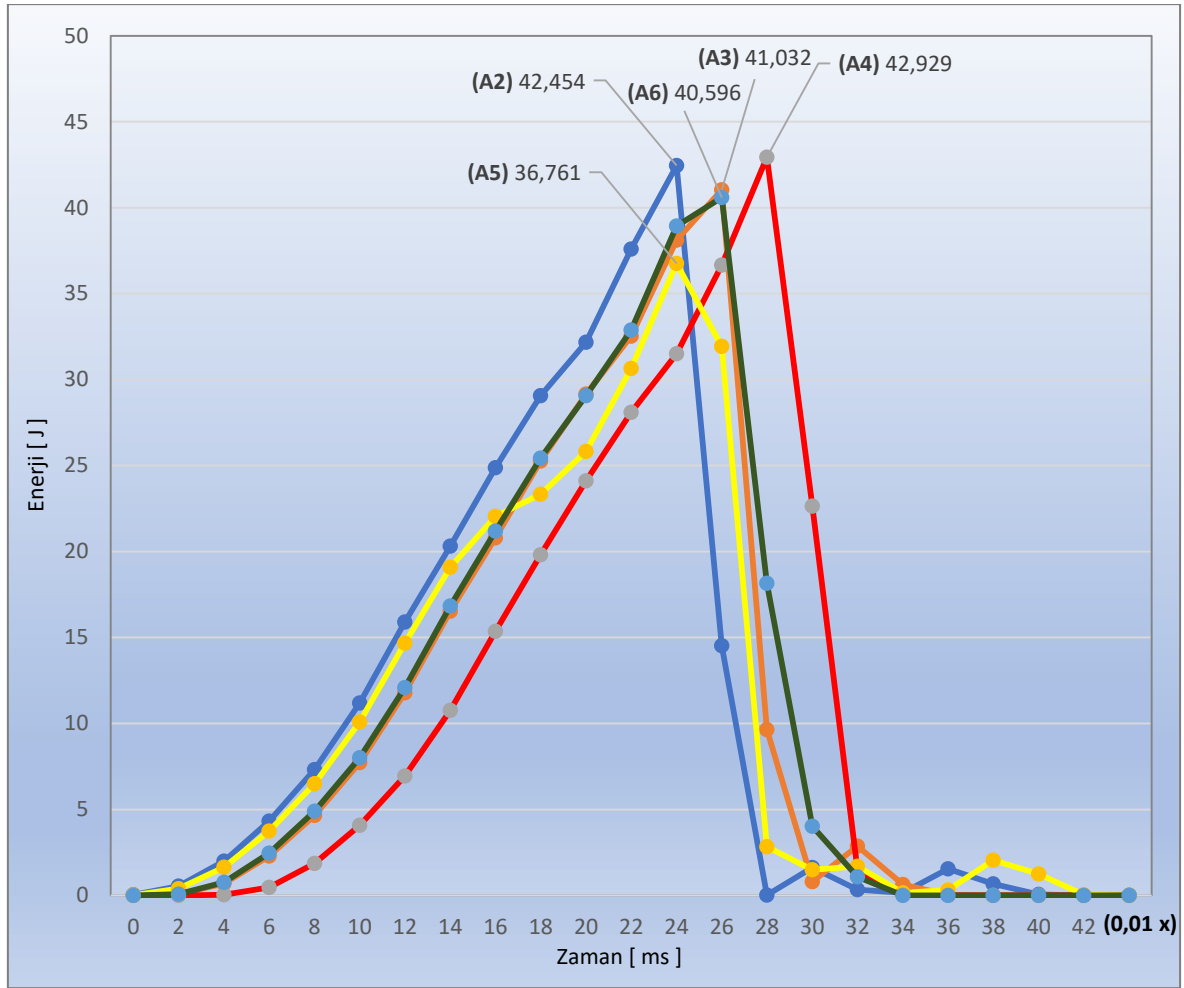
Tablo 4.1 Nano-parçacık katkısız numunelerden elde edilen veriler

KATKISIZ – NANO PARÇACIKSIZ KATKISIZ NUMUNELER			
NUMUNE NO	Max. Enerji (Joule)	Penetrasyon Derinliği LVDT (mm)	Max. Kuvvet (N)
Kalınlık Ortalama: 2,77 (cm)			
A1	-	-	7851
A2	42,454	5,759	-
A3	41,032	3,915	-
A4	42,929	9,387	2119
A5	36,761	6,212	4602
A6	40,596	-	4627
ORTALAMA	40,754	6,318	4799,75

Darbe test cihazının anti-blocker sistemi mevcut olmadığından, ölçülen maksimum ilk negatif (Basma kuvveti nedeniyle) kuvvet; impektörün test plakasına çarptıktan sonra eriştiği en yüksek basma kuvvetini vermektedir. Şekil 4.1 incelendiğinde; ölçülen maksimum pozitif kuvvet okumaları, impektörün plakaya çarptıktan sonra zıplarken okunan kuvvet değerlerini vermektedir. A2 ve A3 no’lu test numunelerinde kuvvet sensöründen veri alınamamıştır.

Şekil 4.1 Kuvvet [N] - Zaman [s] grafiğinde görüldüğü gibi, numune plakalarda geri sekmenin mevcut olduğu görülmektedir. Katkısız (nano-parçacık içermeyen) plakalarda Max. Kuvvet değeri en yüksek A1 no’lu plakada görülmekle beraber, aykırı bulunarak değerlendirme dışı tutulmuştur. Tablo 4.1’de görüldüğü gibi ölçüm alınan numunelerden elde edilen veriler dikkate alındığında, nano-parçacık ihtiva etmeyen numunelerin impektöre karşı gösterdiği ortalama tepki kuvveti 4799 KN. olarak hesaplanmıştır. Darbe direnci en iyi olan A5 no’lu plaka olup, yaklaşık % 6 oranında darbeye karşı daha fazla direnç göstermiş ve delaminasyon, hasar miktarı diğer plakalara göre daha az olmuştur.

Aynı yükseklikten serbest bırakılan impektör kütlelerinin sağladığı KE ile, çarpmaya maruz bırakılan tüm numunelerin bu enerjiye karşı gösterdiği penetrasyon direnci ölçülmek istenildiğinden, çarpma anında numuneye taşınan KE’nin büyüklüğü önem kazanmaktadır. Sürtünme farklılığı, sıcaklık gibi faktörlerden etkilenen düşme hızı, numuneden numuneye farklılık gösterebilmektedir. Bu nedenle, impektörün numuneye temas ettiği anda LVDT üzerinden ölçülen çarpma hızı kullanılarak hesaplanan KE değerlerini gösteren grafik Şekil 4.2’de verilmiş ve Tablo 4.1’de bu değerler özetlenmiştir.

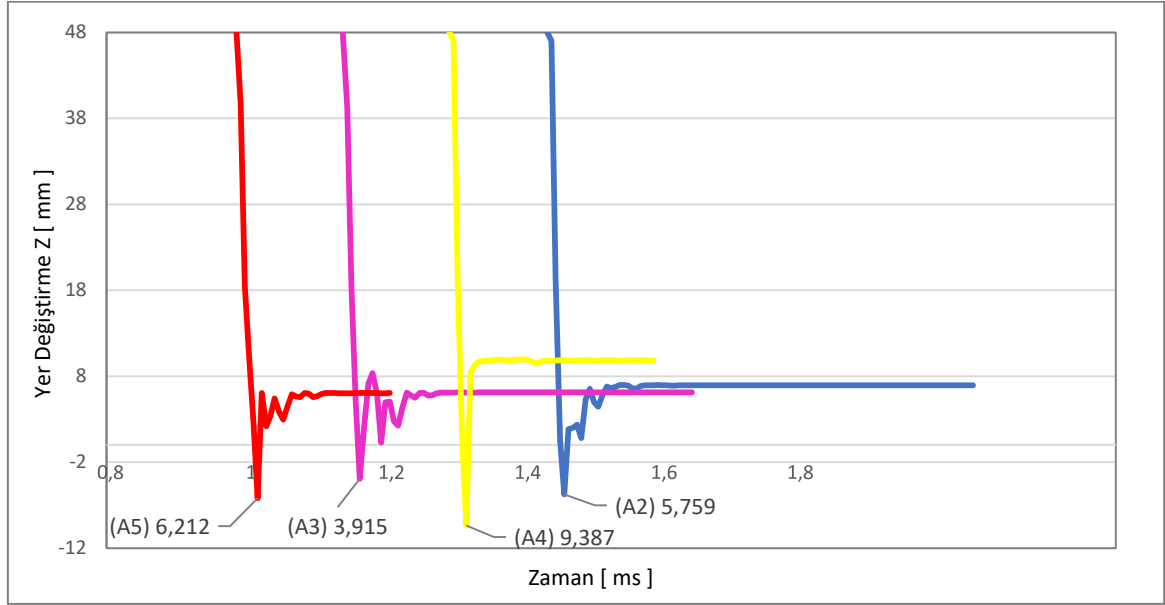


Şekil 4.2 Katkısız [A] – Enerji [J] – Zaman [s] Grafiği

Şekil 4.2 Enerji [J] - Zaman [s] grafiğinde görüldüğü gibi, Katkısız (nano-parçacık içermeyen) plakalarda Max. Enerji değeri en yüksek A4 no'lu plakada görülmekle beraber tüm numuneler için ortalama 40,754 Joule'dür. Katkısız [A] – Enerji [J] – Zaman [s] plakalarına ait tüm grafikler, EK 3'de verilmiştir.

Diğer yandan, impektörün taşıdığı kinetik enerjinin numuneler üzerinde yaratmış olduğu etki, göçük derinliği olarak da adlandırılan çarpma noktasının yer değiştirme boyutu ile ifade edilmektedir. Bu yer değiştirme miktarı, impektörün numune yüzeyine temas ettiği noktayı referans alarak, impektör ucunun yarattığı göçük derinliğini ifade etmektedir. Bu derinlik çoğu kez numune kalınlığının ötesinde bir boyut olup, impektörün numuneyi perfore edemediği, ancak bir miktar numune malzemesini numunenin alt yüzeyinden dışa doğru göçerten bir deformasyon yaratmaktadır. Burada önemli olan; bir mermiyi simüle eden impektörün çarptığı yüzeyi perfore ederek delip geçmediği veya göçertme derinliğini en aza indiren bir yapıyı elde etmektir. Bu nedenle, öncelikle A serisi bu numuneler epoksi matris

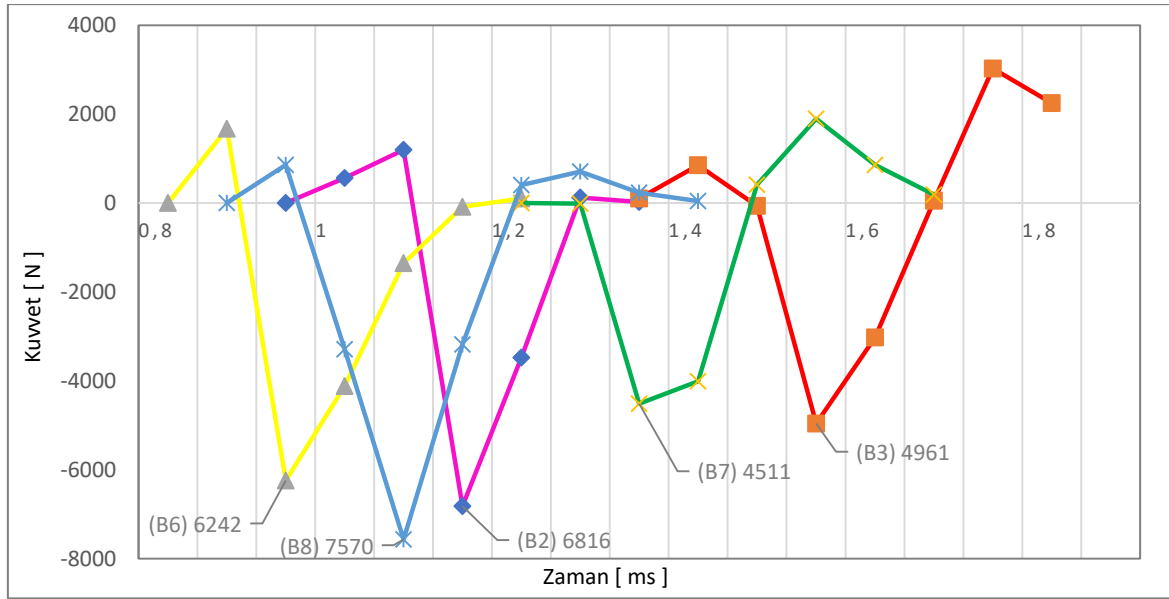
ile aramid fiber ara yüzeyinin nano-parçacık katkılı numuneler ile arasındaki göçük (yer değiştirme) derinliğini kıyaslayabilmek maksadıyla test edilmiştir. Şekil 4.3’de yer değiştirmenin (göçük derinliği) zamana göre değişimi gösterilmektedir. Tablo 4.1’de gösterilen penetrasyon derinliği (LVDT değeri) A4 no’lu plakada 9,387 mm. olarak ölçülmüştür, ancak bu numunede impektör numuneyi delerek göçük alt noktasından dışarı çıkmıştır. Bu nedenle, bu değer değerlendirme dışı tutulmuş olup, ortalama yer değiştirme (göçük) miktarı 6,318 mm. olarak tespit edilmiştir. Katkısız [A] – Yer Değiştirme Z [mm] – Zaman [s] plakalarına ait tüm grafikler, EK 6’da verilmiştir.



Şekil 4.3 Katkısız [A] – Yer Değiştirme Z (Göçük) [mm] – Zaman [s] Grafiği

4.2. TiC – Nano Toz Parçacıklı Plakalar

TiC nano-parçacık ihtiva eden kompozit plakaların düşük hızlı darbe dayanımına etkisini inceleyebilmek için; epoksi reçine içine TiC nano-parçacık katılan plakalar öncelikle test edilmiş, kuvvet-zaman, enerji-zaman ve yer değiştirme (penetrasyon)-zaman grafikleri elde edilmiş olup Şekil 4.4, Şekil 4.5, ve Şekil 4.6’da verilmiştir. Bu grafiklerden elde edilen maksimum değerler Tablo 4.2’de sunulmuştur.



Şekil 4.4 TiC [B] – Kuvvet [N] – Zaman [s] Grafiği

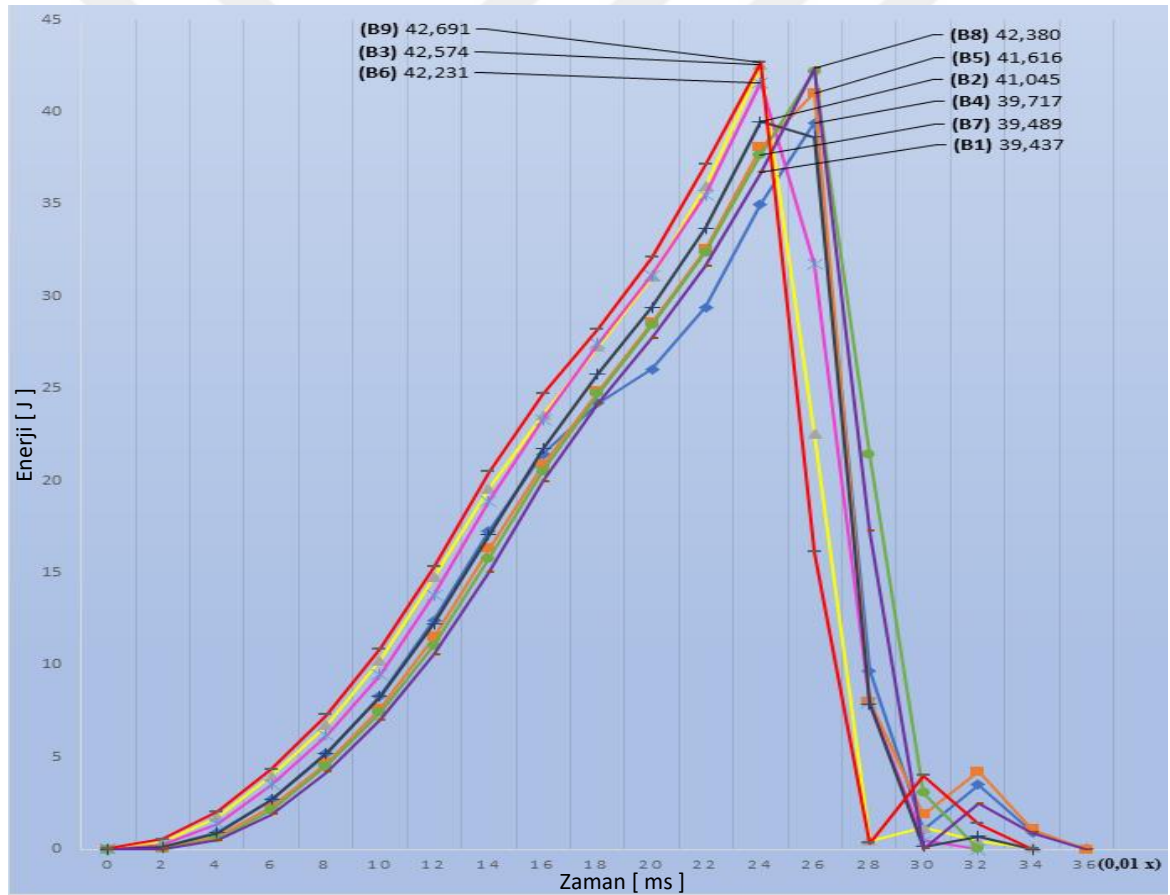
Tablo 4.2 Titanyum karbür (TiC) nano-parçacık katkılı numunelerden elde edilen veriler

TİTANYUM KARBÜR – NANO PARÇACIK KATKILI NUMUNELER			
NUMUNE NO	Max. Enerji (Joule)	Penetrasyon Derinliği LVDT (mm)	Max. Kuvvet (N)
Kalınlık Ortalama: 3,07 (cm)			
B1	39,437	4,181	-
B2	41,045	4,169	6816
B3	42,574	6,62	4961
B4	39,717	3,733	-
B5	-	-	-
B6	-	-	6242
B7	39,489	6,804	4511
B8	42,380	5,118	7570
B9	-	-	-
ORTALAMA	41,242	5,104	6020

Bir önceki bölümde izah edildiği üzere, darbe test cihazının anti-blocker sistemi mevcut olmadığından, ölçülen maksimum ilk negatif (Basma kuvveti nedeniyle) kuvvet impektörün test plakasına çarptıktan sonra eriştiği en yüksek basma kuvvetini vermektedir. Şekil 4.4 incelendiğinde; ölçülen maksimum pozitif kuvvet okumaları, impektörün plakaya

çarptıktan sonra zıplarken okunan kuvvet değerlerini vermektedir. B1, B4, B5 ve B9 no'lu test numunelerinde kuvvet sensöründen veri alınamamıştır.

En yüksek darbe kuvveti B8 no'lu plakada olmasına rağmen B2 no'lu plaka, yaklaşık aynı temas süresinde darbeye karşı yaklaşık % 8 daha fazla direnç göstermiş olup fiber matris kopmaları meydana gelmemiş, delaminasyon ve hasar miktarı diğer plakalara göre daha az olmuştur. Söz konusu durumun panel üretimindeki hatalardan kaynaklandığı değerlendirilmektedir. TiC nano-parçacık içeren plakalarda, Tablo 4.2'de görüldüğü gibi, ölçüm alınan numunelerden elde edilen veriler dikkate alındığında TiC nano-parçacık ihtiva eden numunelerin impektöre karşı gösterdiği ortalama tepki kuvveti 6020 N. olarak hesaplanmıştır. Bu değer katkısız plakaların testlerinde elde edilen 4799,7 N. değerine göre % 25 daha büyüktür.



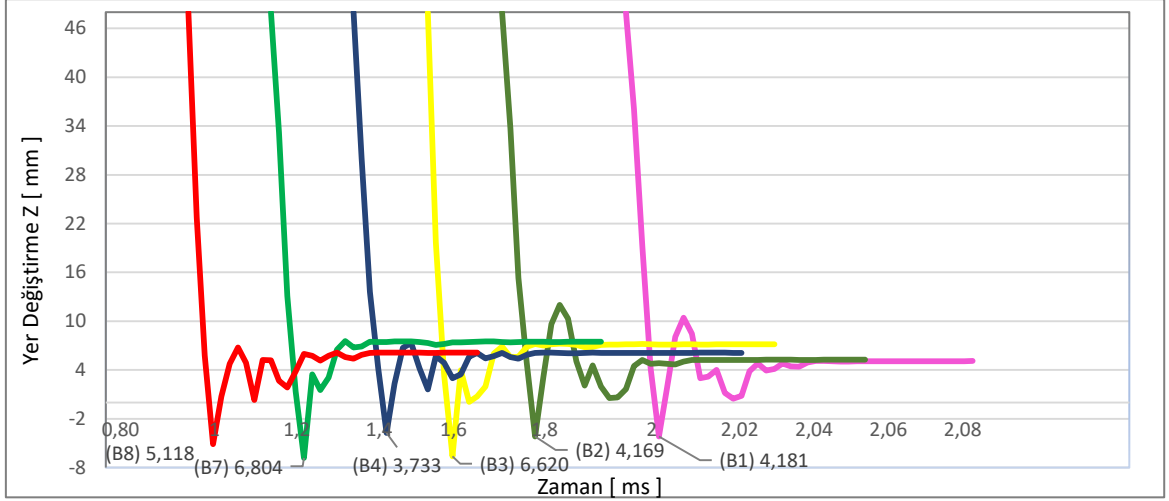
Şekil 4.5 TiC [B] – Enerji [J] – Zaman [s] Grafiği

Sürtünme farklılığı; sıcaklık gibi faktörlerden etkilenen düşme hızı, numuneden numuneye farklılık gösterebilmektedir. Bu nedenle, impektörün numuneye temas ettiği anda LVDT üzerinden ölçülen çarpma hızı kullanılarak hesaplanan KE değerlerini gösteren grafik Şekil 4.5'de verilmiş ve Tablo 4.2'de bu değerler özetlenmiştir.

Şekil 4.5 Enerji [J] - Zaman [s] grafiğinde görüldüğü gibi, TiC nano-parçacık içeren plakalarda Maksimum Enerji değeri en yüksek B9 no'lu plakada görülmekle beraber tüm numuneler için ortalama 41,242 Joul'dür. Titanyum Karbür (TiC) [B] – Enerji [J] – Zaman [s] plakalarına ait tüm grafikler, EK 7'de verilmiştir.

Diğer yandan, impektörün taşıdığı kinetik enerjinin numuneler üzerinde yaratmış olduğu etki göçük derinliği olarak da adlandırılan çarpma noktasının yer değiştirme boyutu ile ifade edilmektedir. Bu yer değiştirme miktarı, impektörün numune yüzeyine temas ettiği noktayı referans alarak, impektör ucunun yarattığı göçük derinliğini ifade etmektedir. Bu derinlik, çoğu kez numune kalınlığının ötesinde bir boyut olup, impektörün numuneyi perfore edemediği ancak bir miktar numune malzemesini numunenin alt yüzeyinden dışa doğru göçerten bir deformasyon yaratmaktadır. Burada önemli olan, bir mermiyi simüle eden impektörün çarptığı yüzeyi perfore ederek delip geçmediği veya göçertme derinliğini en aza indiren bir yapıyı elde etmektir.

Bu nedenle, öncelikle Titanyum Karbür (TiC) nano-parçacık katkılı B serisi test numuneler test edilerek elde edilen sonuçlar, nano-parçacık katkısız numunelerin test sonuçları ile kıyaslanmıştır. Reçine içine ilave edilmiş olan TiC nano-parçacıkların epoksi matris ile aramid fiber ara yüzeyinin daha iyi ıslanmasını sağlayarak, tutunma yüzeyini iyileştirdiği görülmektedir. Yapılan tüm testlerde; çarpma hızının aşağı yukarı aynı olduğu düşünülecek olursa, bu iyileştirme çarpma anında ölçülen ortalama kuvvet değeri ile penetrasyon derinlik değerinde açıkça görülmektedir. TiC nano-parçacık katkılı epoksi ile elde edilmiş numunelerin çarpma anında ölçülen ortalama kuvvet değeri 6020 N. iken, katkısız epoksi ile üretilen aramid plakalarda bu değer 4799,75 N. olarak ölçülmüştür. Bilindiği üzere, çarpma anında ölçülen değerın büyüklüğü, test numunesinin çarpmaya karşı gösterilen direnci ile doğru orantılıdır. Malzemeyi oluşturan aramid fiber (takviye elemanı) ile epoksi reçine (matris) arasındaki ara yüz ne kadar kuvvetli ise, çarpmaya karşı gösterilen direnç dolayısıyla ölçülen kuvvet o ölçüde yüksek olacaktır.



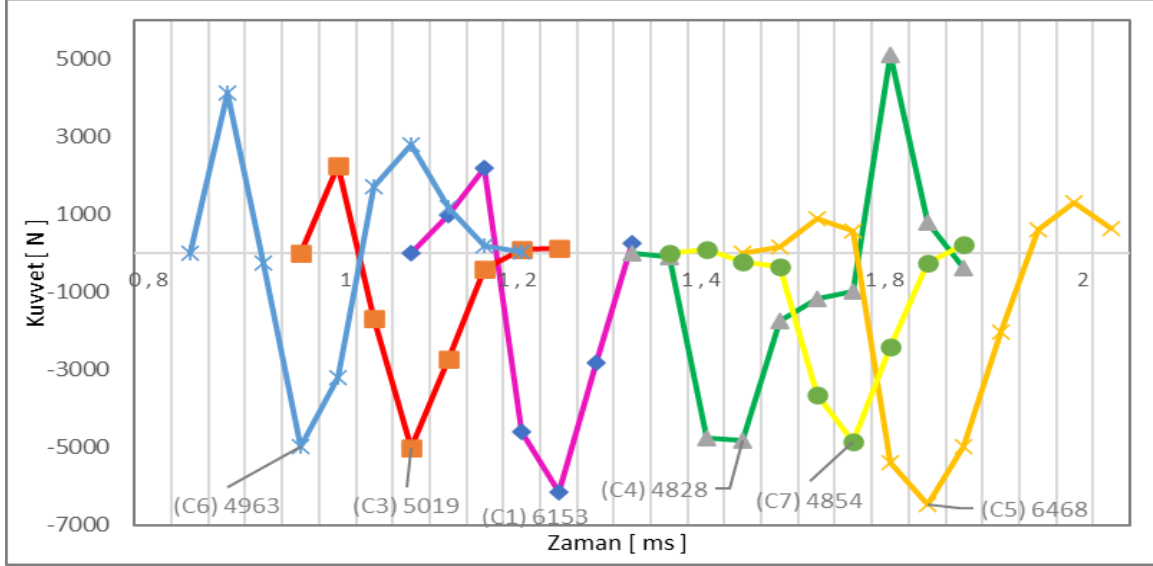
Şekil 4.6 TiC [B] – Yer Değiştirme Z (Göçük) [mm] – Zaman [s] Grafiği

Benzer bir şekilde; TiC nano-parçacık katkılı numuneler ile yapılan testlerde göçük (yer değiştirme) derinliği LVDT kullanılarak elde edildiğinden B4, B5 ve B9 no'lu numunelerde LVDT'nin çalışmaması nedeniyle ölçüm alınamamıştır. Şekil 4.6'da yer değiştirmenin (göçük derinliği) zamana göre değişimi gösterilmektedir. Ölçüm alınan testlerde penetrasyon ya da göçük derinliği ortalama değeri Tablo 4.2'de gösterildiği üzere 5.104 mm. olarak elde edilmiştir. Titanyum Karbür (TiC) [B] – Yer Değiştirme Z [mm] – Zaman [s] nano-parçacıklı plakalara ait tüm grafikler, EK 10'da verilmiştir. TiC nano-parçacık katkılı numuneler için hesaplanan ortalama değer 5.104 mm. iken katkısız epoksi reçine kullanılarak elde edilen numunelerin testlerinde elde edilen ortalama değer olan 6.318 mm.'dir. Bu iki değer kıyaslandığında, TiC nano-parçacık katkılı epoksi reçine ile üretilen numunelerin nano-parçacık katkısız olanlara oranla yaklaşık % 19 oranında göçük derinliğini azaltmış görünmektedir. Titanyum karbür 25 ile 35 nano-metre boyutunda parçacıklardan oluşmakta olup, epoksi ile ıslandığında fiberlerin dış yüzeyini daha iyi kavrayarak, boşluksuz bir ara yüz oluşturmaya katkıda bulunmaktadır. Bu ise darbe anında gelen enerji nedeniyle; fiberlerin epoksi matris içinden sıyrılarak çıkmasına (fiber pull out) ve fiber matris ara yüz ayrılması olarak bilinen delaminasyon (delamination) oluşumunu engellemektedir.

4.3. ZrC – Nano-Toz Parçacıklı Plakalar

Aramid fiber ile epoksi reçine ara yüzünü iyileştirmek amacıyla; epoksi reçine içine katılan Zirkonyum Karbür nano-tozlarının kompozit plakaların düşük hızlı darbe dayanımına etkisini inceleyebilmek için, yapılan düşük hızlı darbe testlerinde kuvvet-zaman,

enerji-zaman ve yer değiştirme (penetrasyon)-zaman grafikleri elde edilmiş ve şekil 4.7, şekil 4.8, ve şekil 4.9’da verilmiştir. Bu grafiklerden elde edilen maksimum değerler Tablo 4.3’de sunulmuştur.



şekil 4.7 ZrC [C] – Kuvvet [N] – Zaman [s] Grafiği

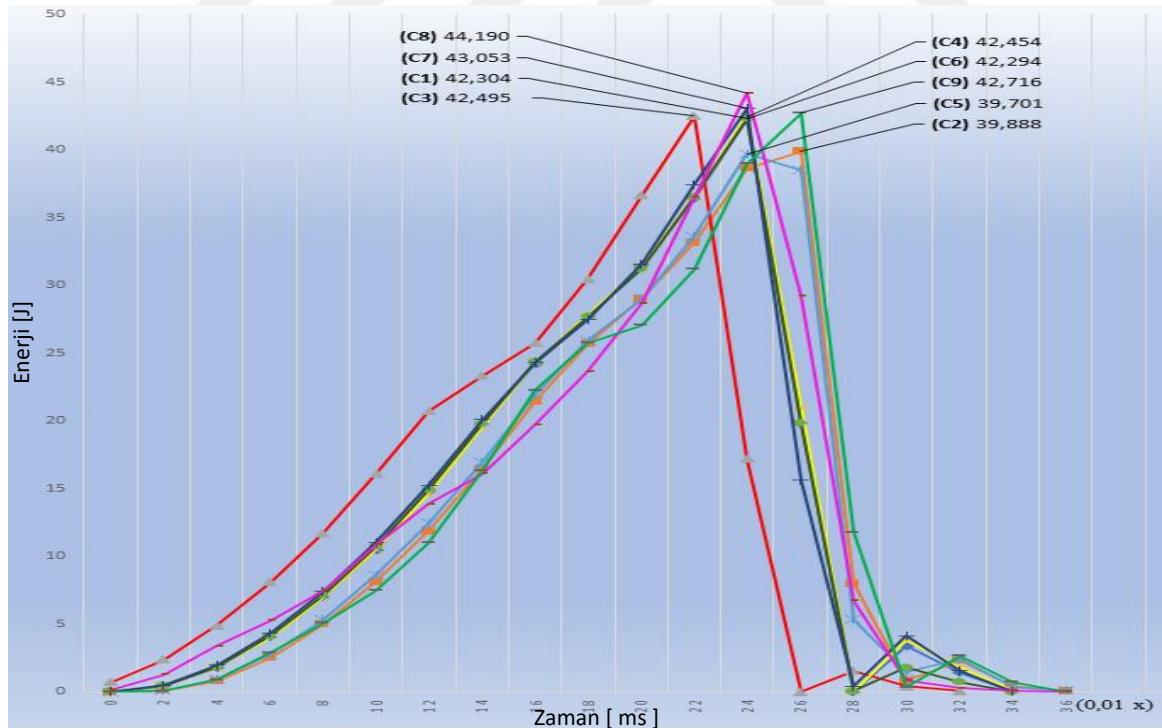
Tablo 4.3 Zirkonyum karbür (ZrC) nano-parçacık katkılı numunelerden elde edilen veriler

ZİRKONYUM KARBÜR - NANO PARÇACIK KATKILI NUMUNELER			
NUMUNE NO	Max. Enerji (Joule)	Penetrasyon Derinliği LVDT (mm)	Max. Kuvvet (N)
Kalınlık Ortalama: 3,11 (cm)			
C1	42,304	6,506	6153
C2	39,888	5,909	-
C3	42,495	6,47	5019
C4	42,454	6,115	4828
C5	39,701	4,024	6468
C6	42,294	-	4963
C7	43,053	6,833	4854
C8	44,190	-	-
C9	42,716	6,694	-
ORTALAMA	42,122	6,079	5380,83

Bir önceki bölümde izah edildiği üzere, darbe test cihazının anti-blocker sistemi mevcut olmadığından, ölçülen maksimum ilk negatif (Basma kuvveti nedeniyle) kuvvet impektörün test plakasına çarptıktan sonra eriştiği en yüksek basma kuvvetini vermektedir.

Şekil 4.7 incelendiğinde; ölçülen maksimum pozitif kuvvet okumaları, impektörün plakaya çarptıktan sonra zıplarken okunan kuvvet değerlerini vermektedir. C2, C8, ve C9 no'lu test numunelerinde kuvvet sensöründen veri alınamamıştır.

Şekil 4.7 Kuvvet [N] - Zaman [s] grafiğinde görüldüğü gibi, darbe kuvvetinin artması ile numuneye etkiyen kuvvette artmaktadır. Darbe enerjisinin artması, fiber kırılmalara ve ayrılmalara sebep olmaktadır. En yüksek darbe kuvveti C5 no'lu plakada olmasına rağmen, C7 no'lu plaka, yaklaşık aynı temas süresinde darbeye karşı yaklaşık % 7 daha fazla direnç göstermiş olup, numune plakada oluşan delaminasyon ve hasar miktarı diğer plakalara göre daha az olmuştur. Söz konusu farklılığın, panel üretimindeki hatalardan kaynaklandığı değerlendirilmektedir. ZrC nano-parçacık içeren plakalarda, Tablo 4.3'de görüldüğü gibi, ölçüm alınan numunelerden elde edilen veriler dikkate alındığında, ZrC nano-parçacık ihtiva eden numunelerin impektöre karşı gösterdiği ortalama tepki kuvveti 5380,83 N. olarak hesaplanmıştır. Bu değer, katkısız numunelere oranla % 12 daha büyüktür.



Şekil 4.8 ZrC [C] – Enerji [J] – Zaman [s] Grafiği

Sürtünme farklılığı, sıcaklık gibi faktörlerden etkilenen düşme hızı, numuneden numuneye farklılık gösterebilmektedir. Bu nedenle, impektörün numuneye temas ettiği anda

LVDT üzerinden ölçülen çarpma hızı kullanılarak, hesaplanan KE değerlerini gösteren grafik, Şekil 4.8’de verilmiş ve Tablo 4.3’de bu değerler özetlenmiştir.

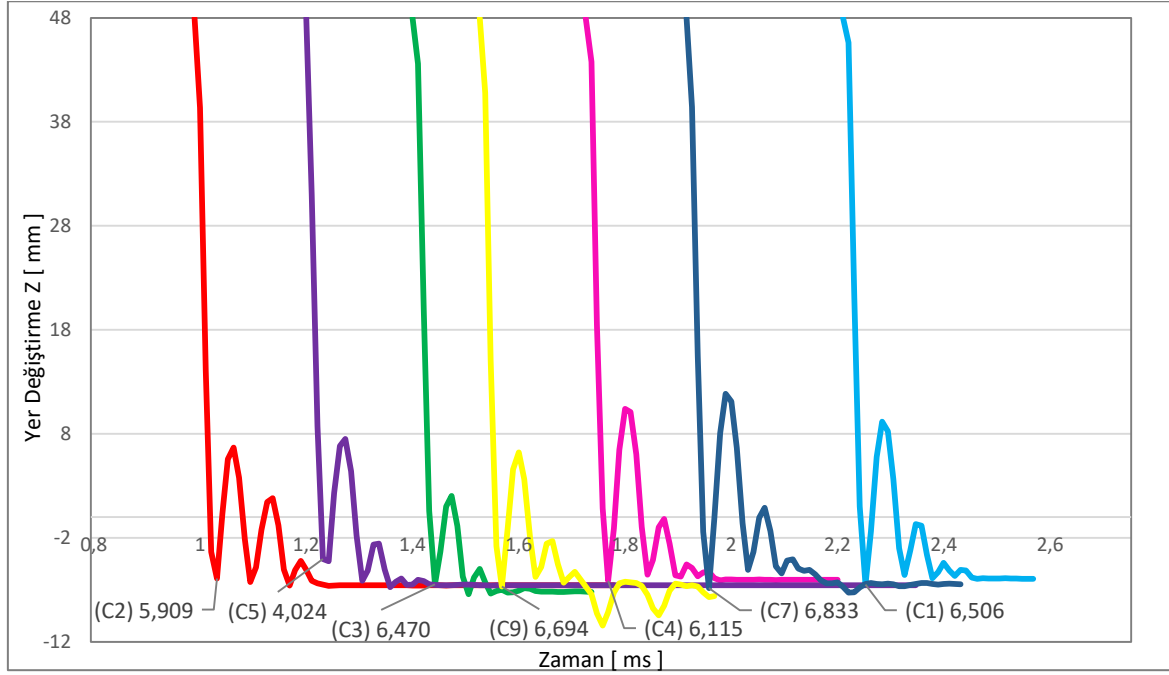
Şekil 4.8 Enerji [J] - Zaman [s] grafiğinde görüldüğü gibi, ZrC nano-parçacık içeren plakalarda tüm numuneler için ortalama 42,122 Joule’dür. Dolayısı ile tüm katkılı ve katkısız kompozit numunelerde çarpma enerjisinin aşağı yukarı aynı olduğu kabul edilebilir. Zirkonyum Karbür (ZrC) [C] – Enerji [J] – Zaman [s] nano-parçacıklı plakalara ait tüm grafikler, EK 11’de verilmiştir. Zirkonyum karbür nano-parçacık içeren epoksi ile imal edilen plakalarda, diğer plaka tiplerinde (Katkısız A ve TiC katkılı B) olduğu gibi, impektörün taşıdığı kinetik enerjinin numuneler üzerinde yaratmış olduğu etki, göçük derinliği olarak da adlandırılan çarpma noktasının yer değiştirme boyutu ile ifade edilmektedir. Bu yer değiştirme miktarı, impektörün numune yüzeyine temas ettiği noktayı referans alarak, impektör ucunun yarattığı göçük derinliğini ifade etmektedir. Bu derinlik, çoğu kez numune kalınlığının ötesinde bir boyut olup, impektörün numuneyi perfore edemediği ancak bir miktar numune malzemesini numunenin alt yüzeyinden dışa doğru göçerten bir deformasyon yaratmaktadır. Burada önemli olan, bir mermiyi simüle eden impektörün çarptığı yüzeyi perfore ederek delip geçmediği veya göçertme derinliğini en aza indiren bir yapıyı elde etmektir.

Tıpkı Titanyum Karbür (TiC) nano-parçacık katkılı B serisi test numunelerde olduğu gibi, Zirkonyum Karbür nano-parçacık katkılı epoksi aramid kompozit plakalarda elde edilen sonuçlar, katkısız epoksi/aramid kompozit plaka sonuçları ile kıyaslanmıştır.

Reçine içine ilave edilmiş olan ZrC nano-parçacıkların epoksi matris ile aramid fiber ara yüzeyinin daha iyi ıslanmasını sağlayarak tutunma yüzeyini iyileştirdiği görülmektedir. Yapılan tüm testlerde çarpma hızının aşağı yukarı aynı olduğu düşünülecek olursa, bu iyileştirme çarpma anında ölçülen ortalama kuvvet değeri ile penetrasyon derinlik değerinde açıkça görülmektedir. ZrC nano-parçacık katkılı epoksi ile elde edilmiş numunelerin çarpma anında ölçülen ortalama kuvvet değeri 5380,83 N. iken, katkısız epoksi ile üretilen aramid plakalarda bu değer 4799,75 N. olarak ölçülmüştür. Bilindiği üzere; çarpma anında ölçülen değerlerin büyüklüğü, test numunesinin çarpmaya karşı gösterilen direnci ile doğru orantılıdır.

Malzemeyi oluşturan aramid fiber (takviye elemanı) ile epoksi reçine (matris) arasındaki ara yüz ne kadar kuvvetli ise, çarpmaya karşı gösterilen direnç, dolayısıyla ölçülen kuvvet, o ölçüde yüksek olacaktır. Bu anlamda, 18 nano-metre boyutunda olan Zirkonyum Karbür nano-parçacıkların fiber/epoksi ara yüzünü katkısız epoksi reçine ile imal edilen kompozit plakalara oranla % 12 oranında iyileştirdiği, ancak Titanyum Karbür nano-

parçacık katkılı epoksi reçineli kompozit plakalara oranla da düşük oranda katkıda bulunduğu görülmektedir. Zirkonyum Karbür nano-parçacıklar (18 nm.) Titanyum Karbür nano-parçacık (25-35 nm.) boyutuna göre daha küçük olduğundan, fiber ile ara yüzeyi daha iyi ıslatması beklenirken, daha büyük parçacığa göre, darbe direncine katkısının daha düşük kalmasının parçacık boyutu küçüldükçe topaklaşma ihtimalinin artmasından kaynaklanabileceği değerlendirilmektedir.



Şekil 4.9 ZrC [C] – Yer Değiştirme Z (Göçük) [mm] – Zaman [s] Grafiği

Benzer bir şekilde; ZrC nano-parçacık katkılı numuneler ile yapılan testlerde göçük (yer değiştirme) derinliği LVDT kullanılarak elde edildiğinden, C3 no'lu numunede LVDT'nin çalışmaması nedeniyle ölçüm alınamamıştır. Şekil 4.9'da yer değiştirmenin (göçük derinliği) zamana göre değişimi gösterilmektedir. Zirkonyum Karbür (ZrC) [C] – Yer Değiştirme Z [mm] – Zaman [s] nano-parçacıklı plakalara ait tüm grafikler, EK 14'de verilmiştir. Ölçüm alınan testlerde penetrasyon ya da göçük derinliği ortalama değeri Tablo 4.3'de gösterildiği üzere 6,079 mm. olarak elde edilmiştir. ZrC nano-parçacık katkılı numuneler için hesaplanan ortalama değer 6,079 mm. iken katkısız epoksi reçine kullanılarak elde edilen numunelerin testlerinde elde edilen ortalama değer olan 6.318 mm.'dir. Bu iki değer kıyaslandığında; ZrC nano-parçacık katkılı epoksi reçine ile üretilen numunelerin nano-parçacık katkısız olanlara oranla yaklaşık % 4 oranında göçük derinliğini azaltmış görünmektedir.

Tablo 4.4 Nano-parçacık katkılı ve katkısız numunelerden elde edilen veriler

NUMUNE	Maksimum Enerji (Joule)	Maksimum Kuvvet (N)	Penetrasyon (Göçük) Derinliği LVDT (mm)	Penetrasyon (Göçük) Derinliğine göre Katkı oranı (%)	Kalınlık (mm)
Katkısız Epoksi	40,754	4799,7	6,318	-	2,7675
TiC Katkılı Epoksi	41,242	6020,0	5,104	19	3,0708
ZrC Katkılı Epoksi	42,122	5380,8	6,079	4	3,1114

Tablo 4.4’de görüldüğü gibi, hazırlanan her grup kompozit numunenin; maksimum enerji, maksimum kuvvet ve penetrasyon (göçük) derinliği değerlerinin ortalaması alınmıştır. Sensörlerden veri alınamayan yada ayrıık değerler alınan test numuneleri ortalamaya dahil edilmemiştir. Her bir testte vurucu uç aynı yüksekliğe çıkarıldığından ve her defasında aynı yük ile serbest düşüşe bırakıldığından, sürtünme kayıpları farklılığı ile numuneye çarpma anında aynı büyüklükte bir enerjiye ulaştığı tablodan görülmektedir. Bu tabloya bakıldığında, Titanyum nano-parçacık katkılı plakaların % 19 oranında katkısız plakalara oranla daha az penetrasyon derinliği verdiği görülmektedir. Diğer bir deyişle katkısız plakalara oranla % 19 oranında darbeye daha fazla direnç sağlamaktadır. Diğer yandan zirkonyum nano-parçacıklar, katkısız olan plakalara oranla yaklaşık % 4 oranında darbe direncini artırmakla birlikte, titanyum nano-parçacık katkılı olan plakalara oranla darbe direncine katkısı daha düşük kalmıştır. Bu durum, yük hücresinden alınan kuvvet verilerinden de görülmektedir. En yüksek karşı koyma direnci, titanyum nano-parçacık katkılı plakalarda (6020 N.) görülmektedir. Yukarıda Tablo 4.4’de görüldüğü gibi, titanyum nano-parçacık katkılı plakalarda ölçülen maksimum kuvvet ile de teyit edildiği üzere LVDT’den alınan penetrasyon derinliği değeri, TiC katkılı plakalara göre daha az olmuştur. Darbe anında ölçülen kuvvet ne kadar büyük olursa, penetrasyon o ölçüde az olacaktır.

5. SONUÇ

Bu çalışma kapsamında, reçine içine nano-parçacık ilavesinin aramid fiber/epoksi reçine ile oluşturulmuş kompozit plakaların darbe direncine etkisi incelenmiştir. Darbe direncine etki eden faktörler araştırıldığında, takviye elemanı fiber ile yük transferini sağlayan epoksi matrisin cinsinin çok önemli olduğu ortaya konmuş olsa da, matris yapısının fiber ile ara yüzünün nano-parçacık veya nano-tube parçacıklar ile takviye edilmesinin kompozit plakaların toplam darbe direncine önemli katkı sunduğu literatürde bulunan çalışmalarda tespit edilmiştir. Ancak bu çalışmalarda, çok sayıda farklı tipte nano-parçacık veya nano-tube parçacık kullanıldığı görülmektedir. Bu çalışmada literatürde az rastlanan; Titanyum Karbür (TiC) ve Zirkonyum Karbür (ZrC) nano-parçacıkların kompozit plakaların düşük hızlı darbe direncine etkisi ele alınmıştır.

TiC nano-parçacık takviyeli plakalar, maksimum darbe yüküne maruz kaldıktan sonra diğer plakalara oranla penetrasyona karşı daha fazla direnç göstermiş olup, matris çatlama kırılma yüzeylerinde diğer plakalara oranla daha az hasar oluşmuştur.

Referans olarak alınan nano-parçacık katkısız reçine plakalar ile TiC ve ZrC nano-parçacık ilave edilmiş reçinenin aramid fiber kumaşlara emdirilmesi ile elde edilmiş plakaların düşük hızlı darbe testlerinde, her iki nano-parçacığın da darbe direncini arttırdığı görülmüştür. Ancak özellikle; TiC nano-parçacıkların epoksi reçineli aramid kompozit plakaların darbe direncini % 19 oranında artırdığı tespit edilirken, ZrC nano-parçacıkların bu direnci ancak % 4 oranında arttırdığı tespit edilmiştir. Söz konusu bu artışların tespit edilmesinde, darbe sonrasında LVDT sensöründen elde edilen göçük derinliği esas alınmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Y. Barlas. “Boeing’leri yıldırımdan koruyan kumaş Türklerden.” HABERTURK.com <https://www.haberturk.com/boeingleri-yildirimdan-koruyan-kumas-turklerden-2254150-ekonomi> (Accessed: Dec. 10, 2018).
- [2] Advanced Composite Cluster, Bursa – BTSO. *Kompozit Malzemelerin Tanımı ve Gelişimi*. (2018). [Online]. Available: <http://www.accluster.com/kompozit-malzemelerin-tanimi-ve-gelisimi/>
- [3] A. Aran, “Mal-201 - Malzeme Bilgisi,” İTÜ Makina Fakültesi, pp. 75, 2007-2008 [Online]. Available: <http://www2.isikun.edu.tr/personel/ahmet.aran/mal201.pdf>
- [4] J. F. Shackelford, “Shackelford Mühendisler İçin Malzeme Bilimine Giriş,” B. Özkal, M. Baydoğan, Çev. İstanbul: Literatür Yayınları, 2018
- [5] P. M. Ajayan, L. S. Schadler and P. V. Braun, Eds., “Nano-Composite Science and Technology,” Germany: Wiley-VCH Press, 2003
- [6] P. H. C. Camargo, K. G. Satyanarayana and F. Wypych, “Nano-Composite: Synthesis, Structure, Properties and New Application Opportunities,” *Materials Research*, vol. 12, no.1, pp. 1-39, 2009, doi: 10.1590/S1516-14392009000100002
- [7] M. Evangelos, “Nano-Composites: Stiffer by Design,” *Journal of Nature Materials*, 6(1), pp. 9–11, 2007, doi: 10.1038/nmat1812
- [8] S. Behrens and A. Ingo, “Magnetic Nano-Composites,” *Journal of Current Opinion in Biotechnology*, 39, pp. 89–96, 2016, doi: 10.1016/j.copbio.2016.02.005
- [9] S. Behrens, “Preparation of Functional Magnetic Nano-Composites and Hybrid Materials: Recent Progress and Future Directions,” *Journal of Nanoscale*, (3)3, pp. 877–892, 2011, doi: 10.1039/C0NR00634C
- [10] H. B. Kaybal, H. Ulus, O. Demir, Ö. S. Şahin and A. Avcı, “Effects of Alumina Nano-particles on Dynamic Impact Responses of Carbon Fiber Reinforced Epoxy Matrix Nano-Composites,” *Engineering Science and Technology, an International Journal Jestech*, vol. 21, no. 3, pp. 399-407, 2018, doi: 10.1016/j.jestech.2018.03.011

- [11] M. H. Meybodi, S. S. Samandari, M. Sadighi and M. R. Bagheri, "Low Velocity Impact Response of a Nano-Composite Beam Using an Analytical Model," *Latin American Journal of Solids and Structures*, 12(2), pp. 333-354, 2015, doi: 10.1590/1679-78251346
- [12] T. H. Mahdi, Md. E. Islam, M. V. Hosur and S. Jeelani, "Low Velocity Impact Performance of Carbon Fiber Reinforced Plastics Modified with Carbon Nano-Tube, Nano-Clay and Hybrid Nano-Particles," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 0(0), pp. 1-18, 2017, doi: 10.1177/0731684417693429
- [13] A. C. Tatar, H. B. Kaybal, H. Ulus, O. Demir and A. Avcı, "Evaluation of Low Velocity Impact Behavior of Epoxy Nano-composite Laminates Modified with SiO₂ Nano-particles at Cryogenic Temperatures," *Journal of Research on Engineering Structures and Materials*, 5(2), pp. 115-125, 2019, doi: 10.17515/resm2018.55is0704
- [14] E. M. Soliman, M. P. Sheyka and M. R. Taha, "Low Velocity Impact of Thin Woven Carbon Fabric Composites Incorporating Multi Walled Carbon Nano-Tubes," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 47, pp. 39-47, 2012, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2012.03.002
- [15] N. Tsartsaris, M. Meo, F. Dolce, U. Polimeno, M. Guida and F. Marulo, "Low Velocity Impact Behavior of Fiber Metal Laminates," *Journal of Composite Materials*, 45(7), pp. 803-814, 2011, doi: 10.1177/0021998310376108
- [16] Z. Asaee, M. Mohamed, D. D. Cicco and F. Taheri, "Low Velocity Impact Response and Damage Mechanism of 3D Fiber-Metal Laminates Reinforced with Amino-Functionalized Graphene Nanoplatelets," *International Journal of Composite Materials*, vol. 7, no. 1, pp. 20-36, 2017, doi: 10.5923/j.cmaterials.20170701.03
- [17] S. Patil, D. M. Reddy and M. Reddy, "Low Velocity Impact Analysis on Composite Structures," *AIP Conference Proceedings*, 1943(1), 2018, doi: 10.1063/1.5029585
- [18] F. Elaldi, J. L. Chen, S. Lee and J. S. Wu, "Manufacture of Carbon Fiber Nano-Based Epoxy Composite Laminates using a Vacuum-Assisted Resin Transfer Mold," *Canadian International Conference on Composite Materials*, CANCOM2017, Ottawa CANADA, 17-20 July 2017.

EKLER



EK 1: TİC NANO-PARÇACIKLI MALZEMELERİN ÖZELLİKLERİ VE LABORATUAR TEST SONUÇ RAPORU



Nanografi Nano Teknoloji Bilişim İmalat ve Danışmanlık Ltd. Şti.

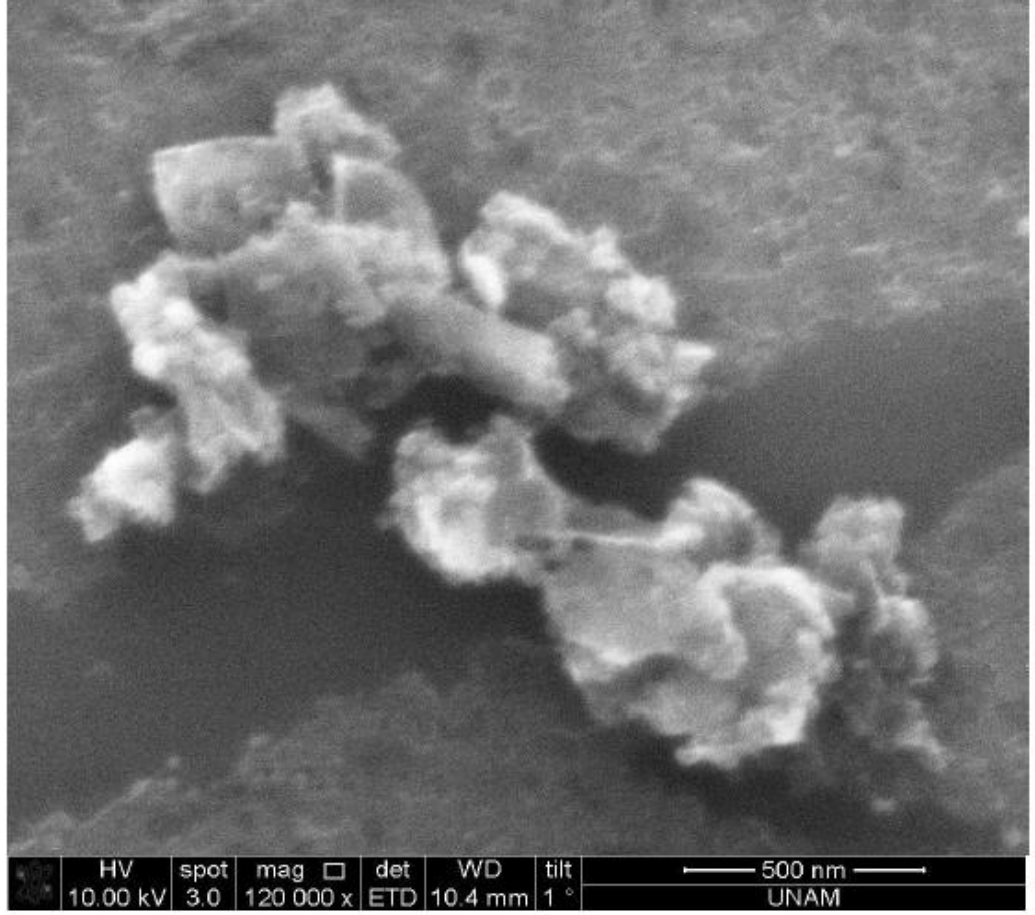
Graphene Doped Titanium Carbide Nanopowder (%50 TiC)

50wt% Titanium Carbide (TiC) Nanopowder Parameters:

Purity (%): 99.5+
Color: Black
Average Particle Size (nm): 35-55
Specific Surface Area (m²/g): 50
Bulk Density (g/cm³): 0.08
True Density (g/cm³): 4,5
Melting Point (°C): 3200
Crystal Phase: cubic
Zeta Potential (mV): 25,00
Morphology nearly: spherical
Elemental Analysis (%):
O: 0.9
Mg: 0.0003
Al: 0.006
Cu: 0.0003

50wt% Graphene Nanopowder Parameters:

Purity: 99.9 %
Thikness (nm): 3
Diameter (µm): 1.5
Specific Surface Area (m²/g): 800
Conductivity (s/m): 1500-1980
Color: Black



Titanyum karbür (TiC) nano-parçacıklı malzemelerin laboratuvar görüntüleri

EK 2: ZRC NANO-PARÇACIKLI MALZEMELERİN ÖZELLİKLERİ VE LABORATUAR TEST SONUÇ RAPORU



Nanografi Nano Teknoloji Bilişim İmalat ve Danışmanlık Ltd. Şti.

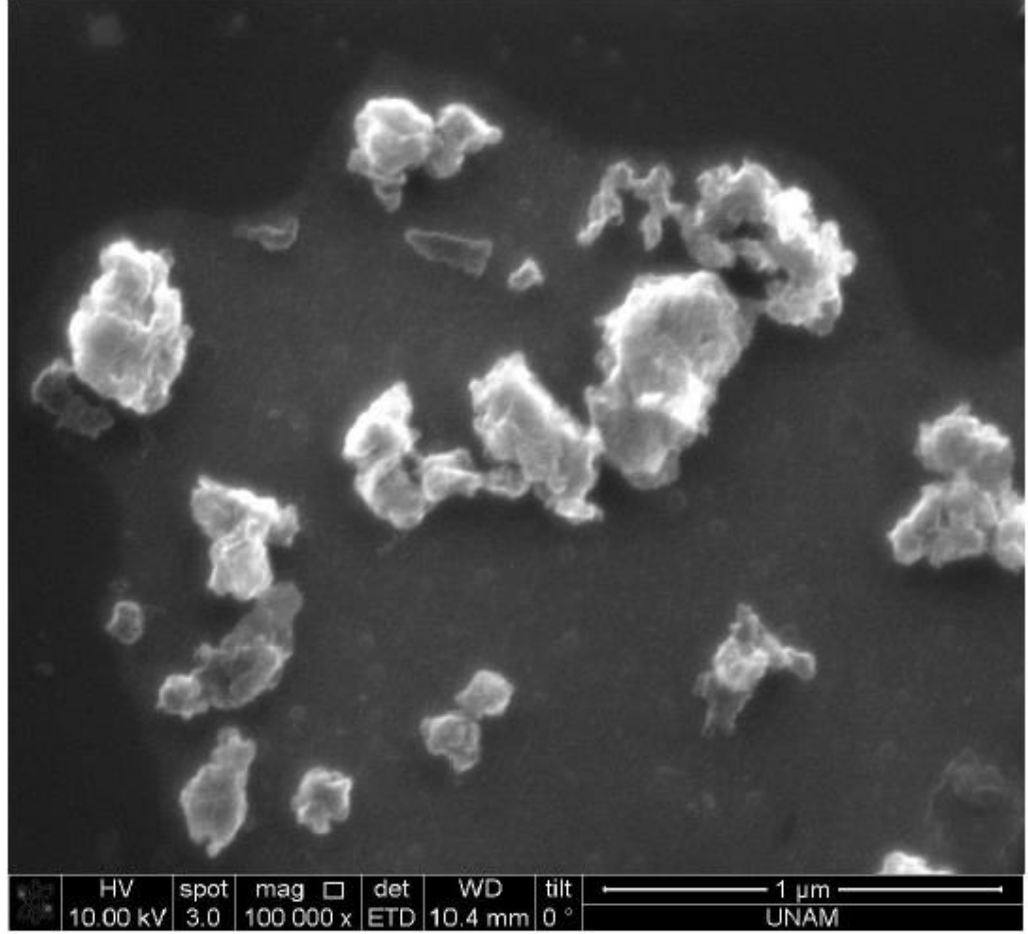
Graphene Doped Zirconium Carbide Nanopowder (%50 ZrC)

50wt% Titanium Carbide (TiC) Nanopowder Parameters:

Purity (%): 99.5+
Oxygen Content (%): < 1.0
Color: black
Average Particle Size (nm): 18
Specific Surface Area (m²/g): 25-75
Bulk Density (g/cm³): 0.08
True Density (g/cm³): 6,80
Zeta Potential (mV): -23,90
Crystal Structure: cubic

50wt% Graphene Nanopowder Parameters:

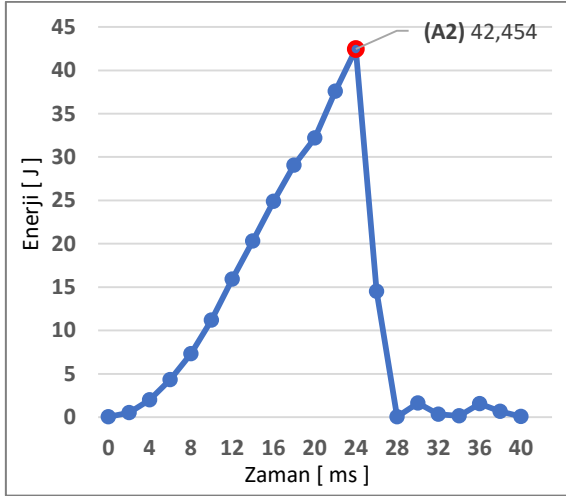
Purity: 99.9 %
Thikness (nm): 3
Diameter (µm): 1.5
Specific Surface Area (m²/g): 800
Conductivity (s/m): 1500-1980
Color: Black



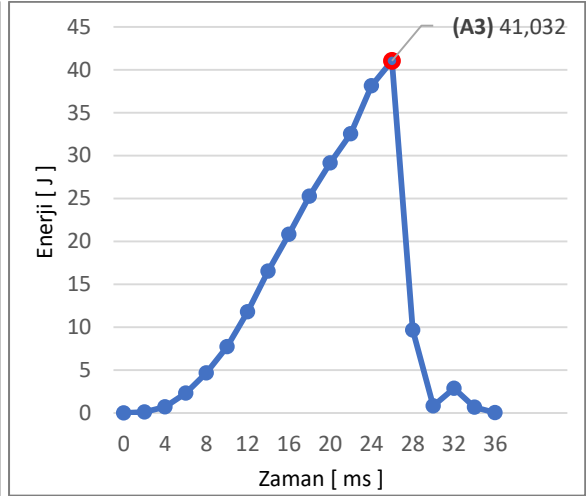
Zirkonyum karbür (ZrC) nano-parçacıklı malzemelerin laboratuvar görüntüleri

EK 3: KATKISIZ [A] – ENERJİ [J] – ZAMAN [S] GRAFİKLERİ

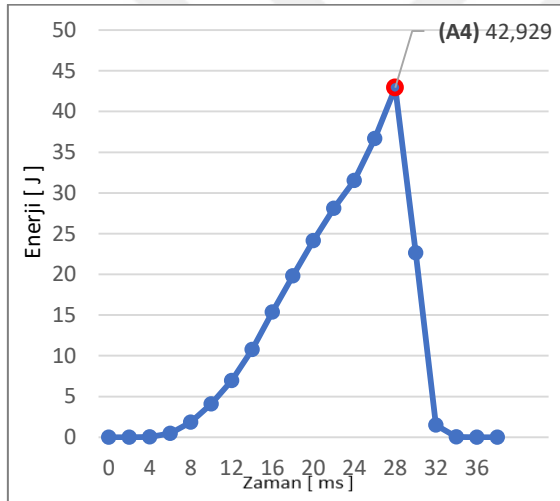
A2



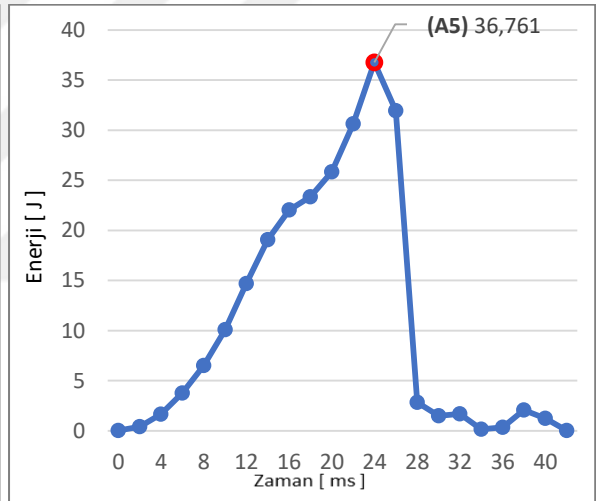
A3



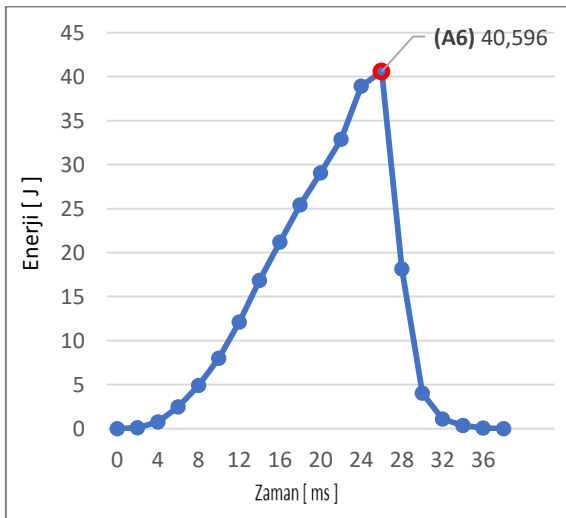
A4



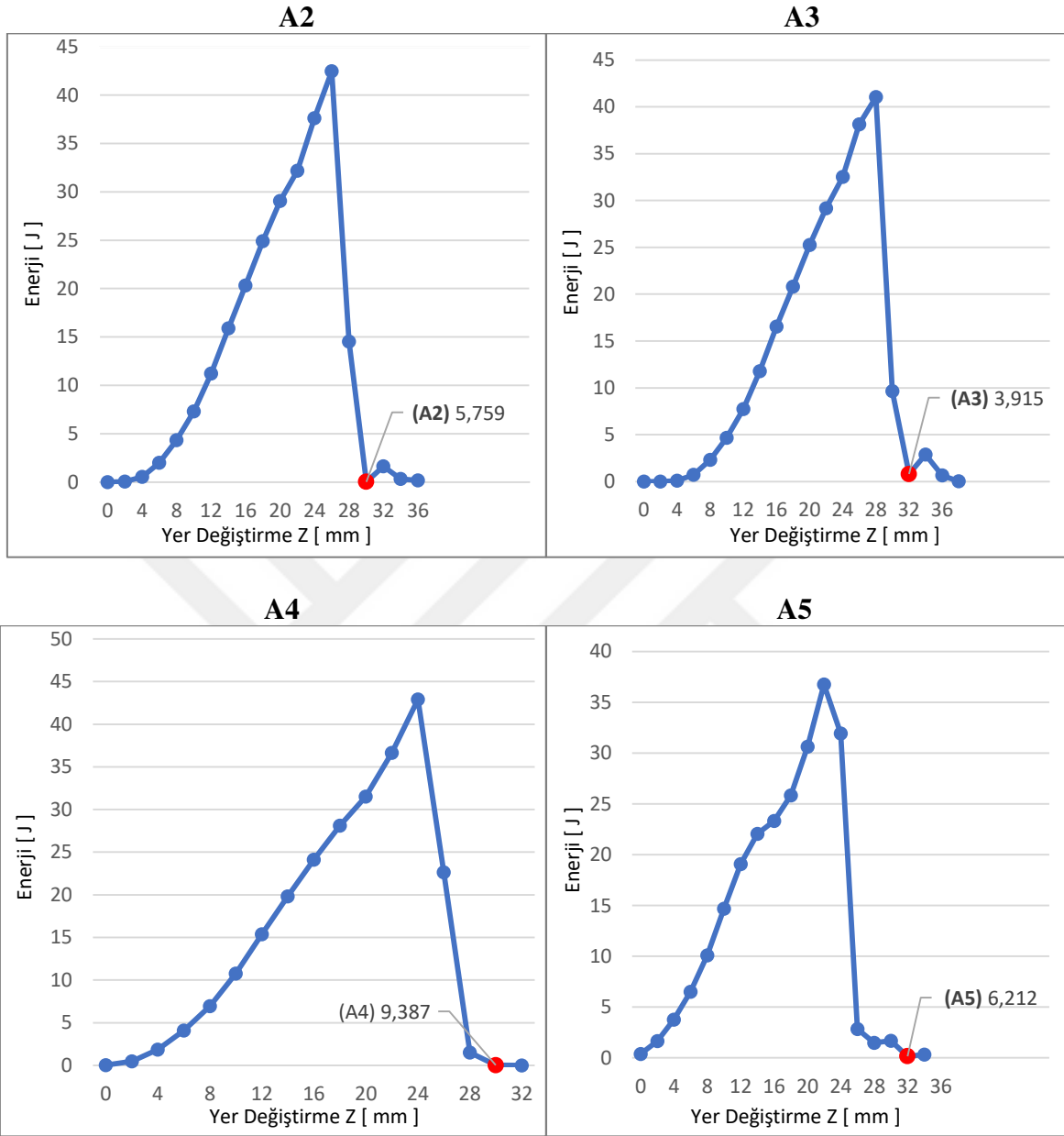
A5



A6

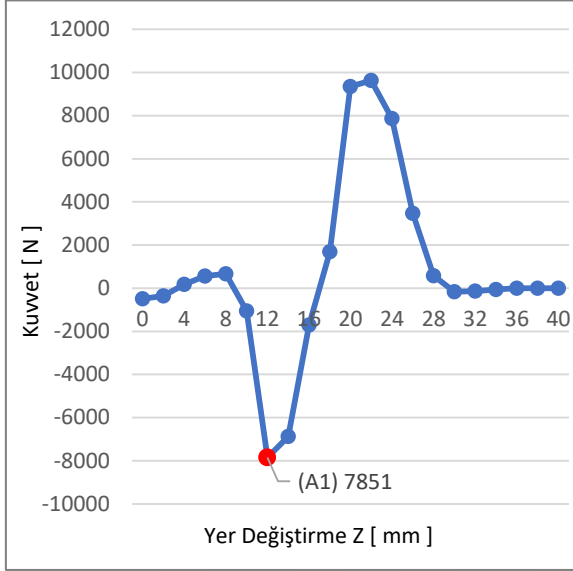


EK 4: KATKISIZ [A] – ENERJİ [J] – YER DEĞİŞTİRME Z (GÖÇÜK) [MM] GRAFİKLERİ

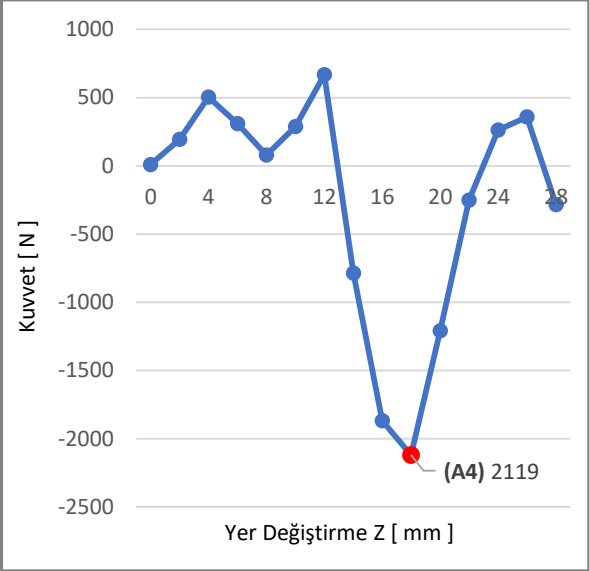


EK 5: KATKISIZ [A] – KUVVET [N] – YER DEĞİŞTİRME Z (GÖÇÜK) [MM] GRAFİKLERİ

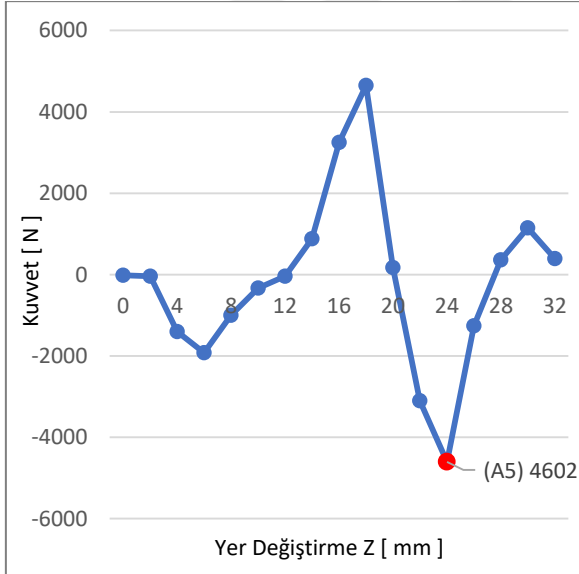
A1



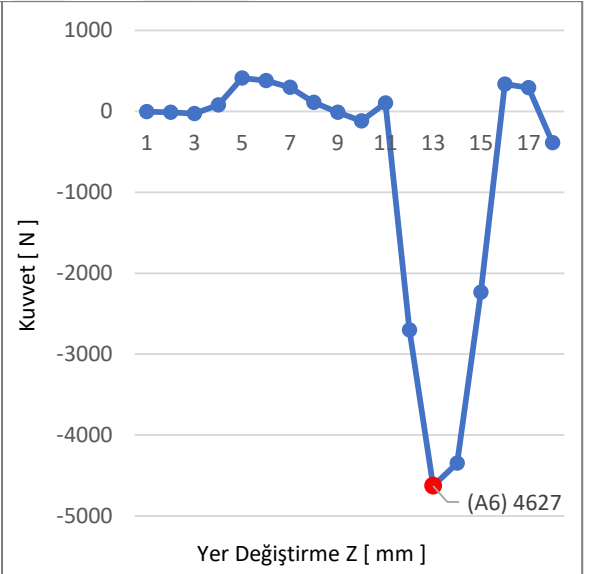
A4



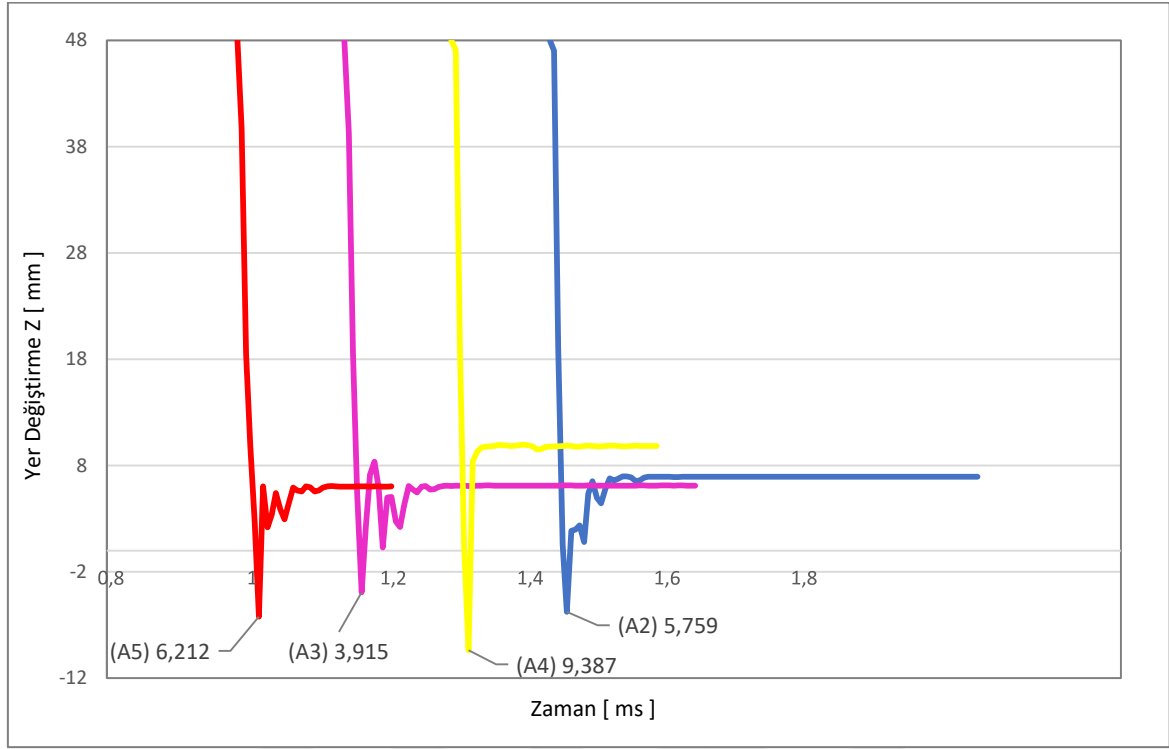
A5



A6

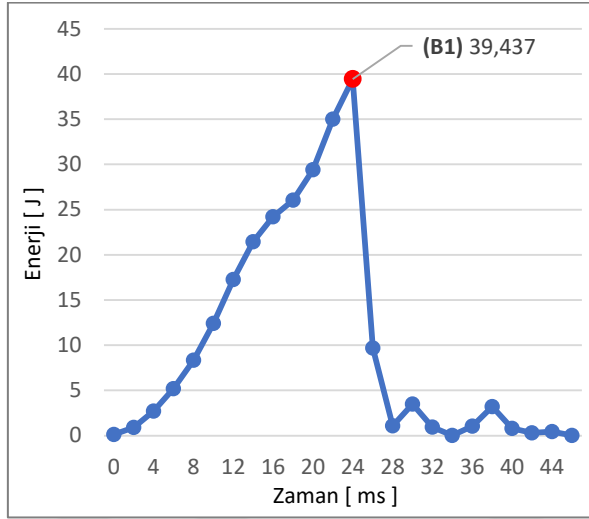


**EK 6: KATKISIZ [A] – YER DEĞİŞTİRME Z (GÖÇÜK) [MM] – ZAMAN [S]
GRAFİKLERİ**

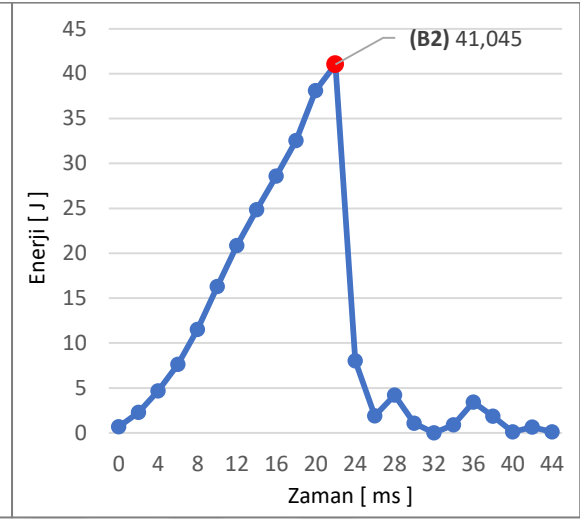


EK 7: TİC [B] – ENERJİ [J] – ZAMAN [S] GRAFİKLERİ

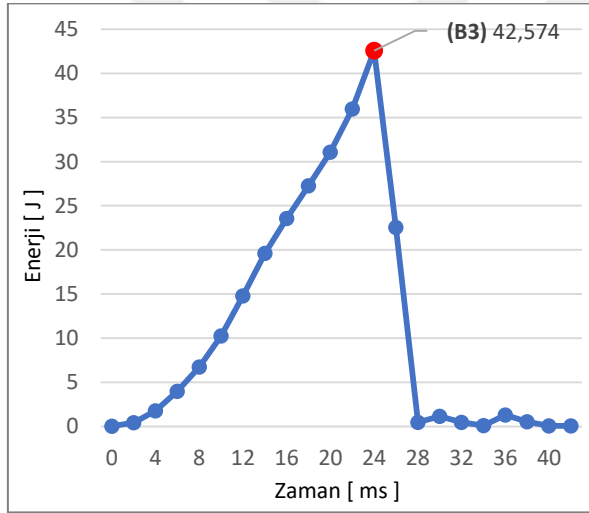
B1



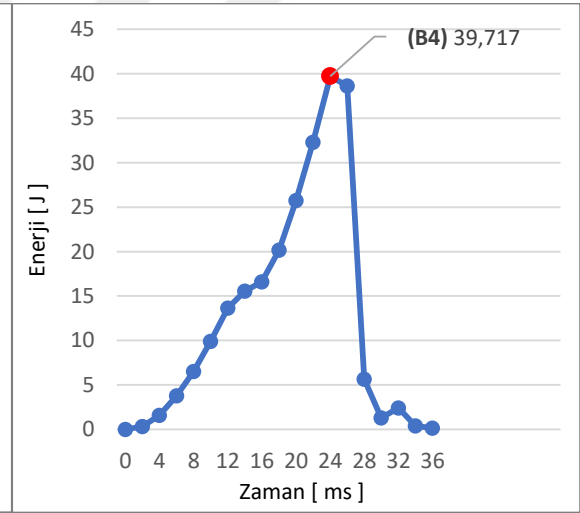
B2



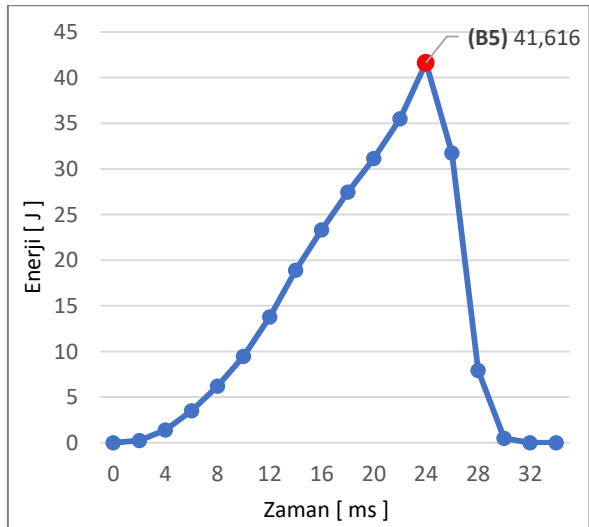
B3



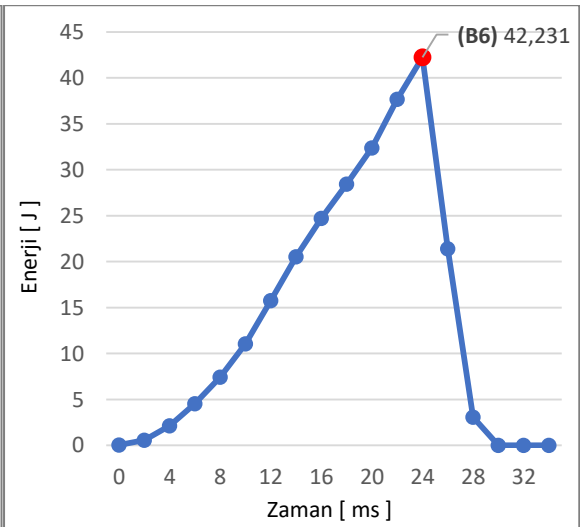
B4

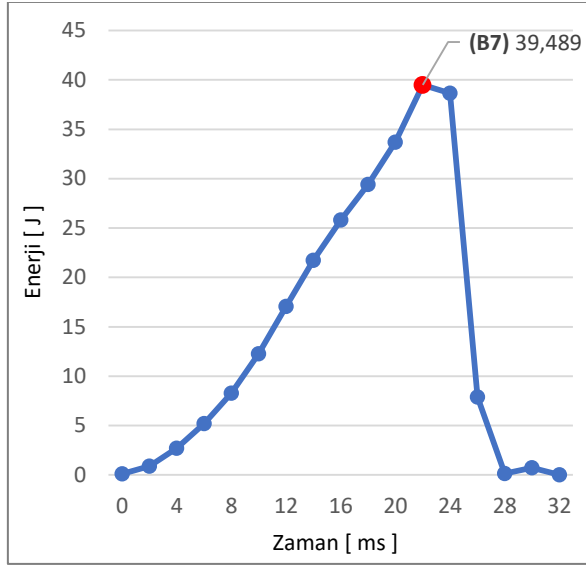
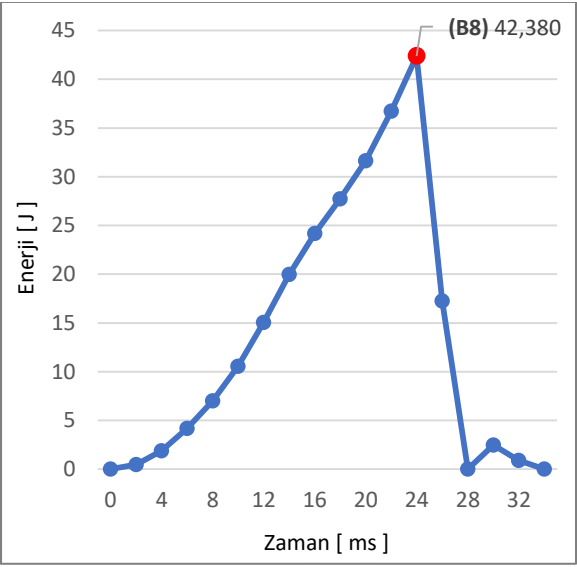
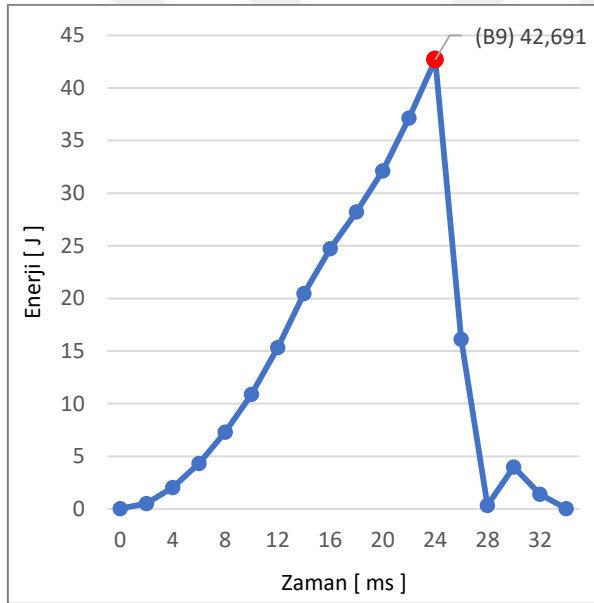


B5

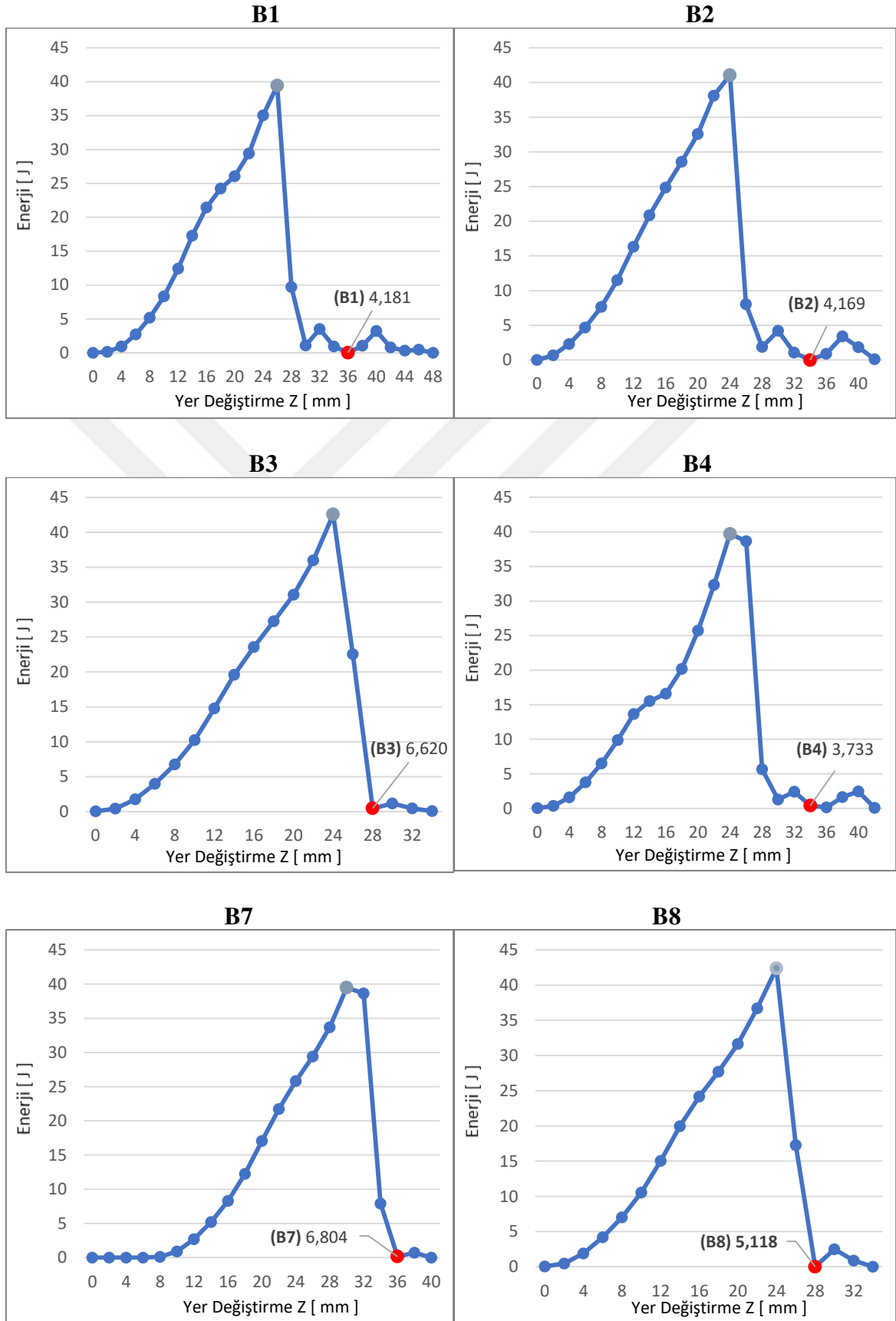


B6



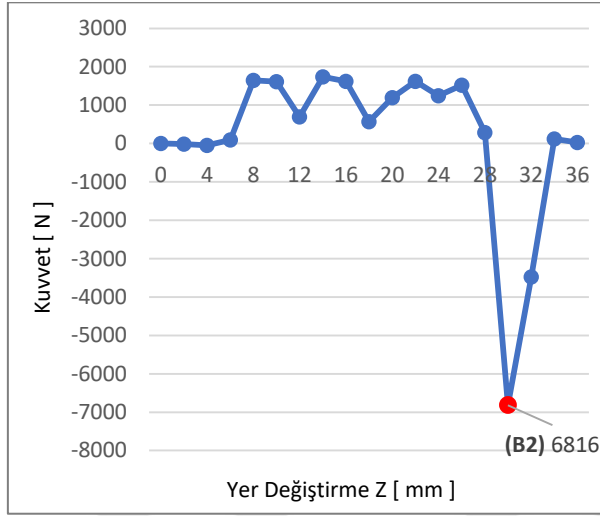
B7**B8****B9**

EK 8: TİC [B] – ENERJİ [J] – YER DEĞİŞTİRME Z (GÖÇÜK) [MM] GRAFİKLERİ

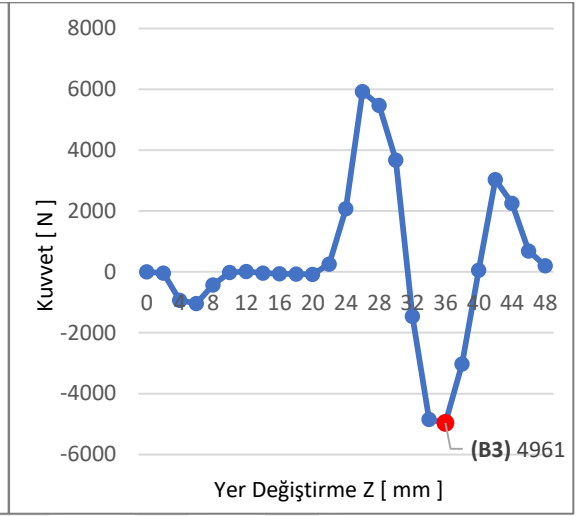


EK 9: TİC [B] – KUVVET [N] – YER DEĞİŞTİRME Z (GÖÇÜK) [MM] GRAFİKLERİ

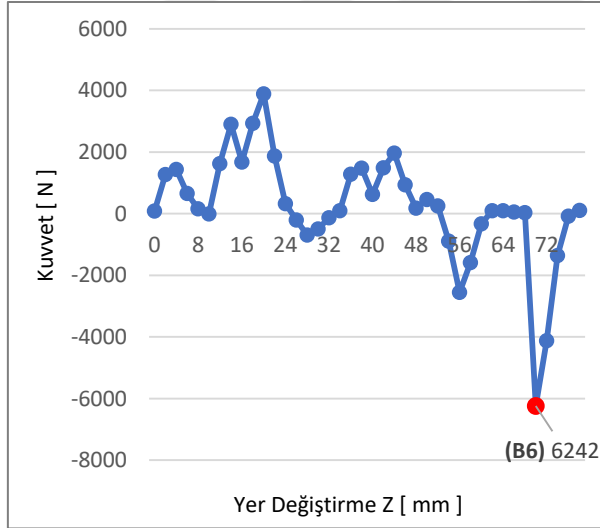
B2



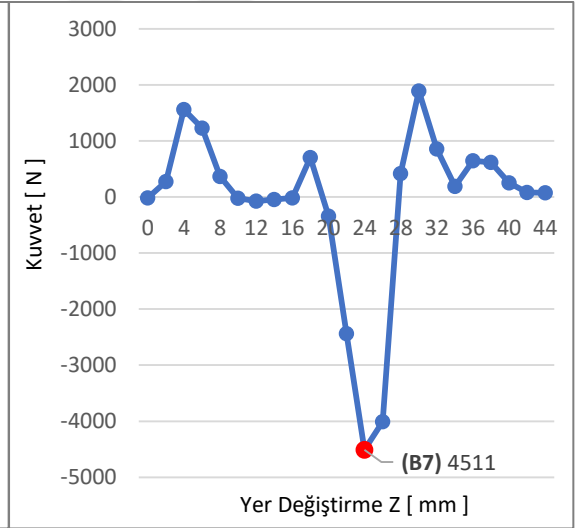
B3



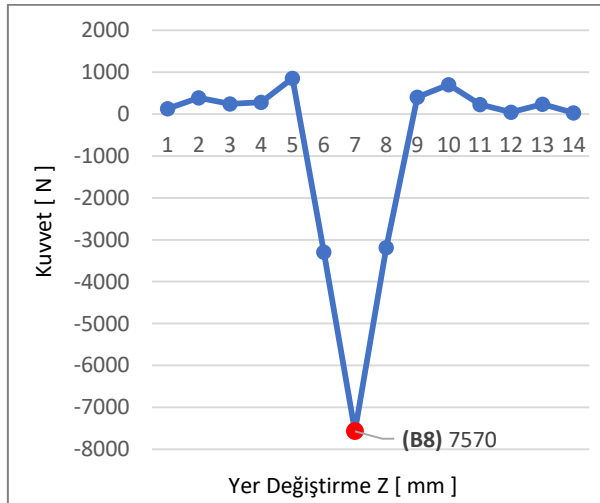
B6



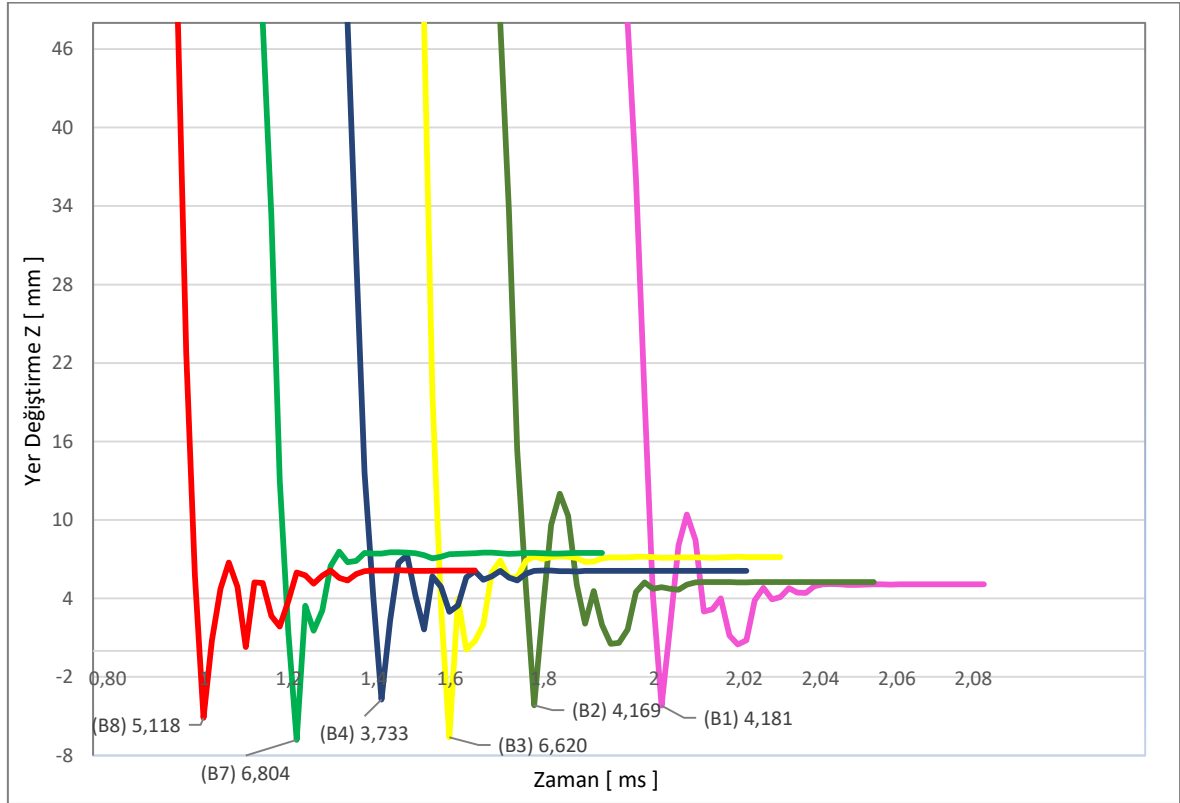
B7



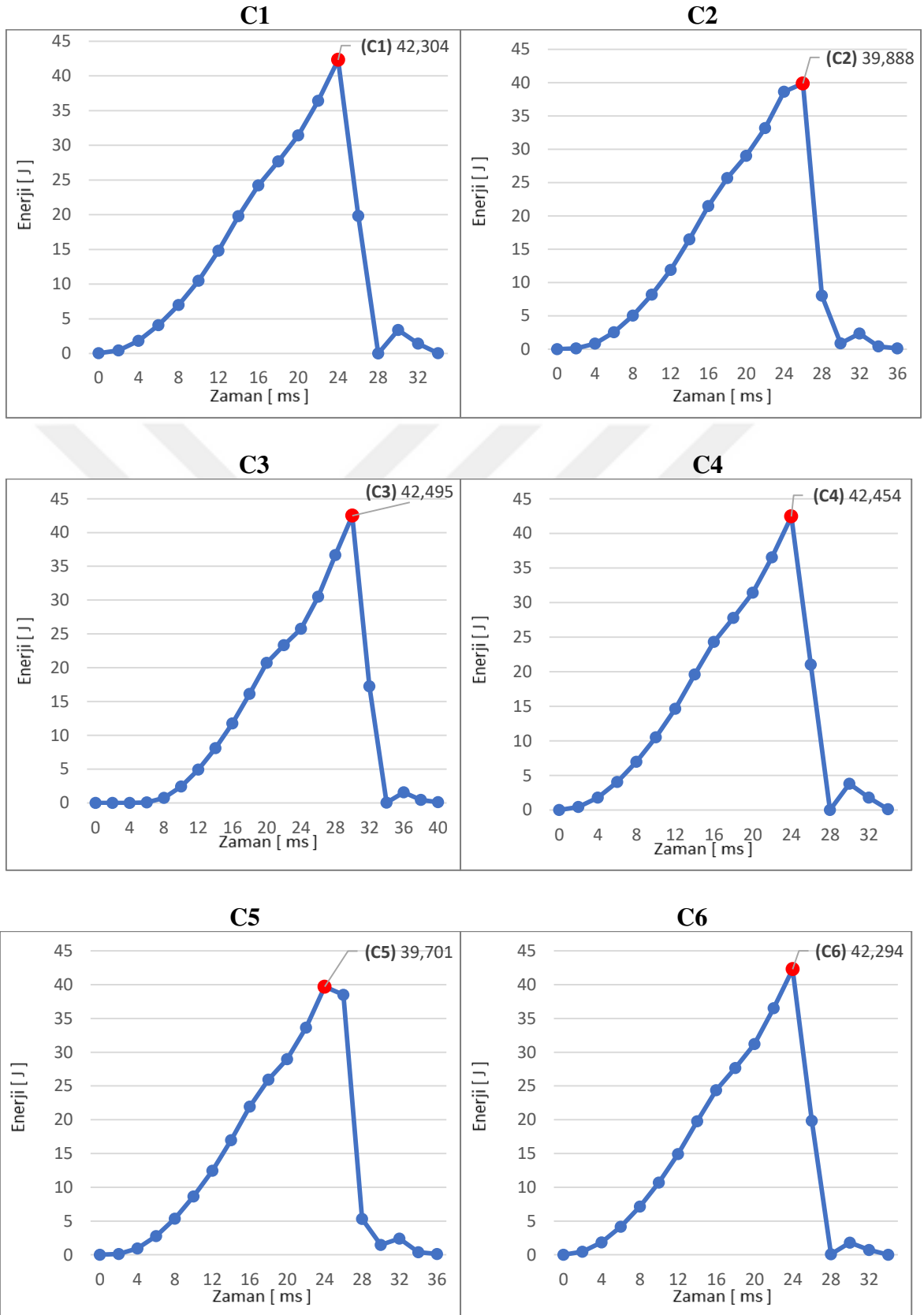
B8

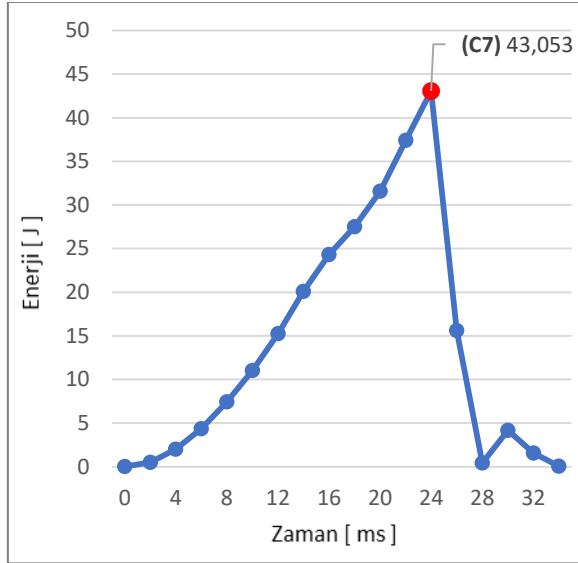
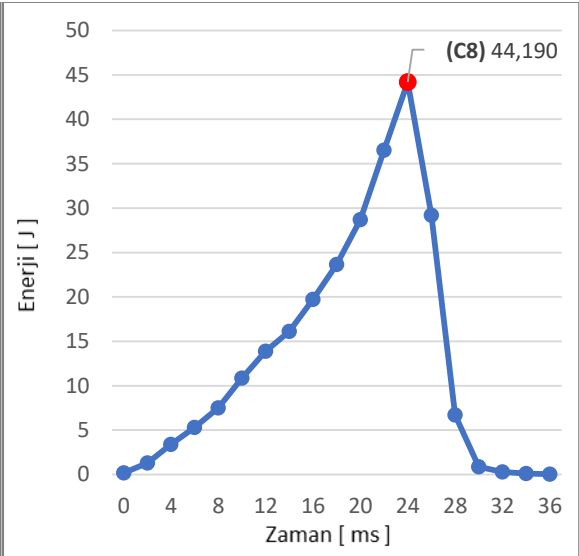
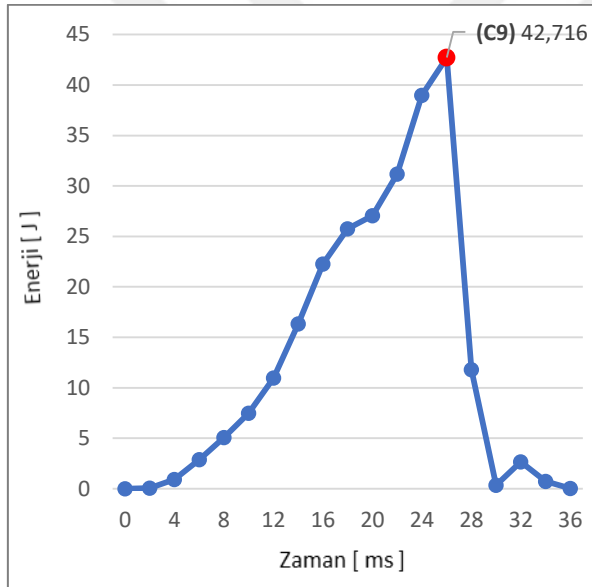


**EK 10: TİC [B] – YER DEĞİŞTİRME Z (GÖÇÜK) [MM] – ZAMAN [S]
GRAFİKLERİ**

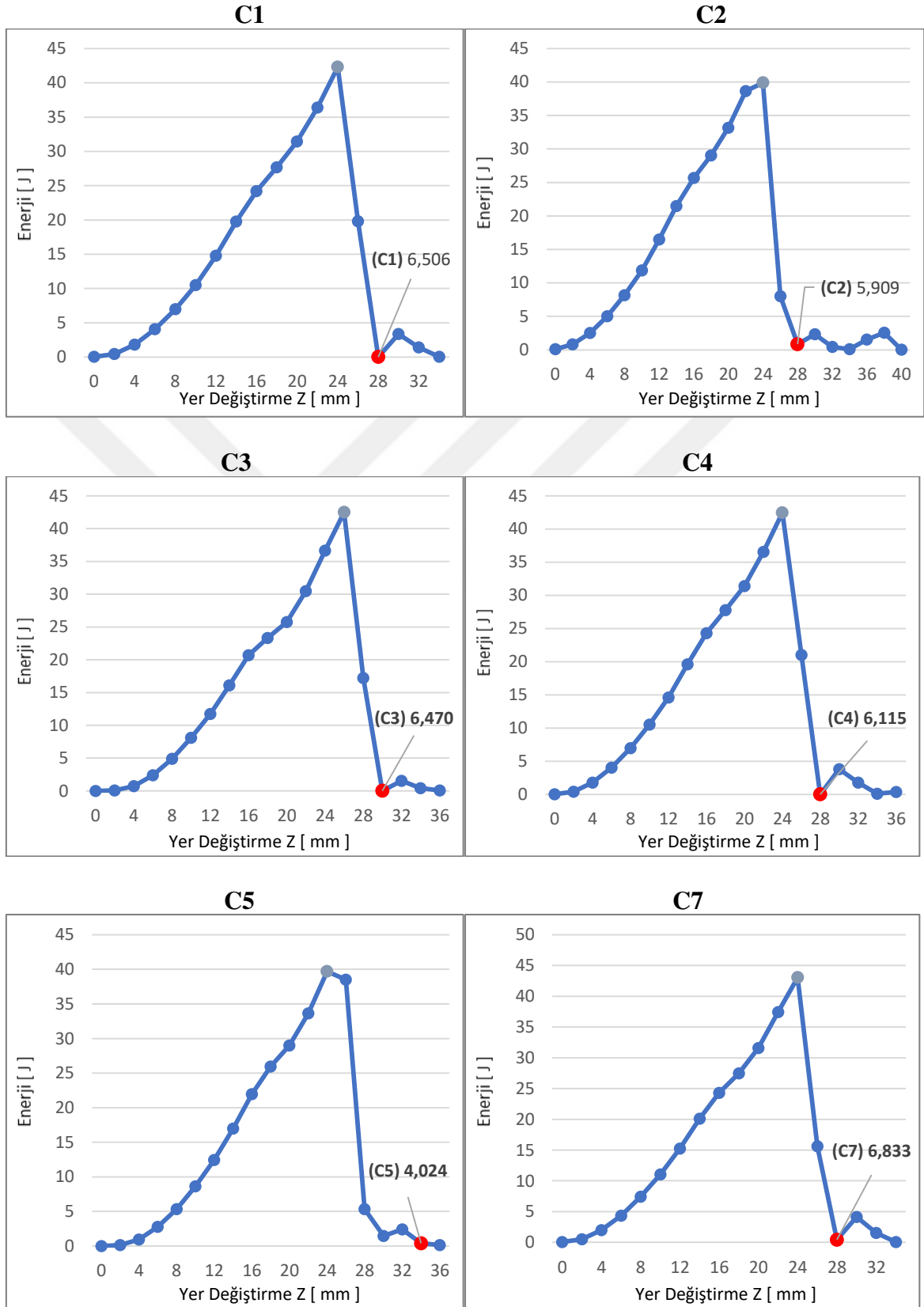


EK 11: ZRC [C] – ENERJİ [J] – ZAMAN [S] GRAFİKLERİ

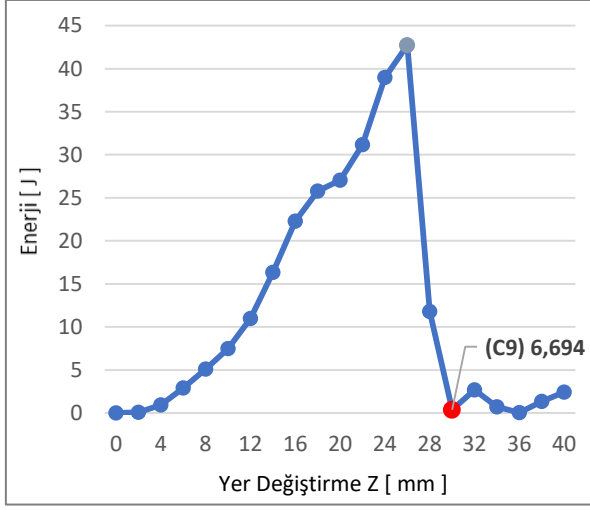


C7**C8****C9**

EK 12: ZRC [C] – ENERJİ [J] – YER DEĞİŞTİRME Z (GÖÇÜK) [MM] GRAFİKLERİ

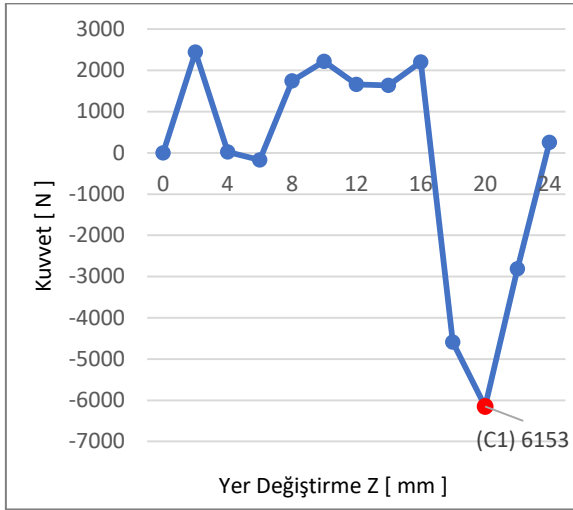


C9

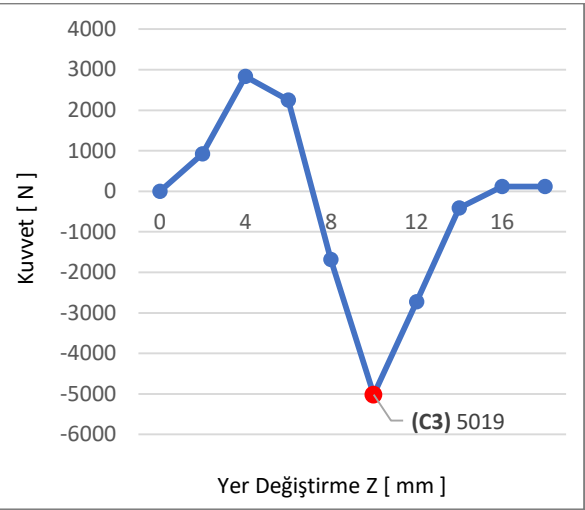


EK 13: ZRC [C] – KUVVET [N] – YER DEĞİŞTİRME Z (GÖÇÜK) [MM] GRAFİKLERİ

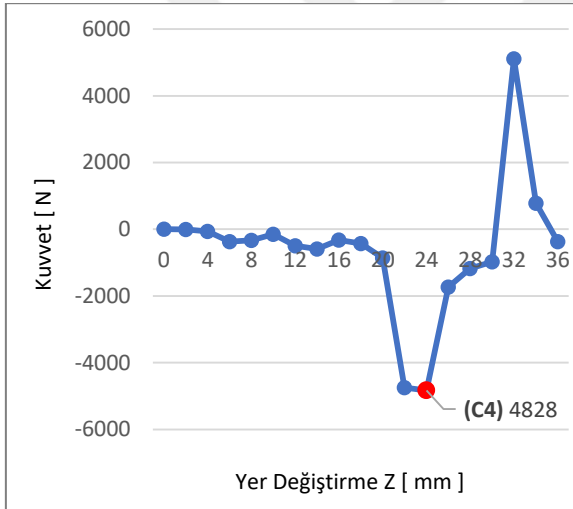
C1



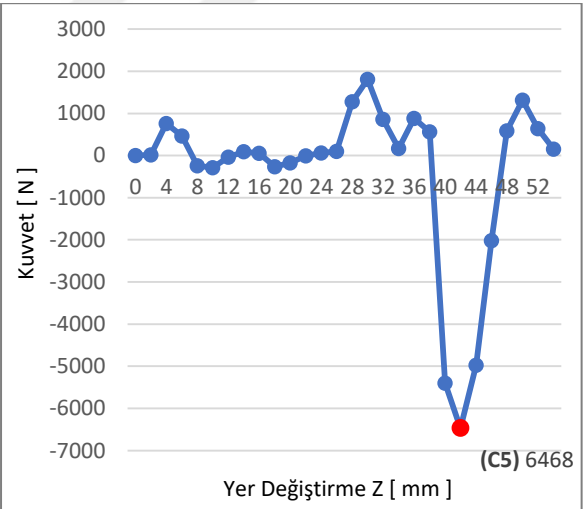
C3



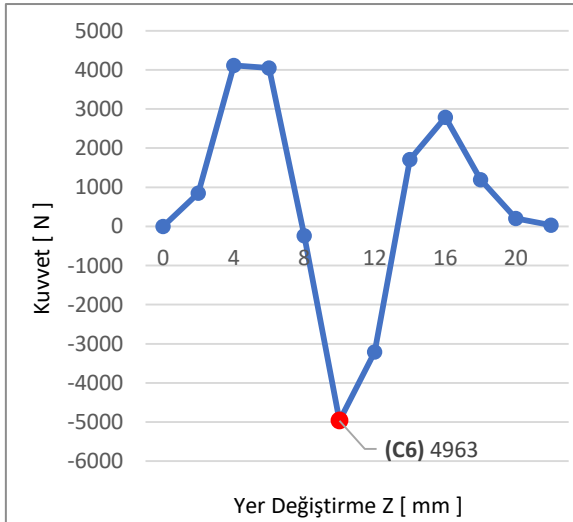
C4



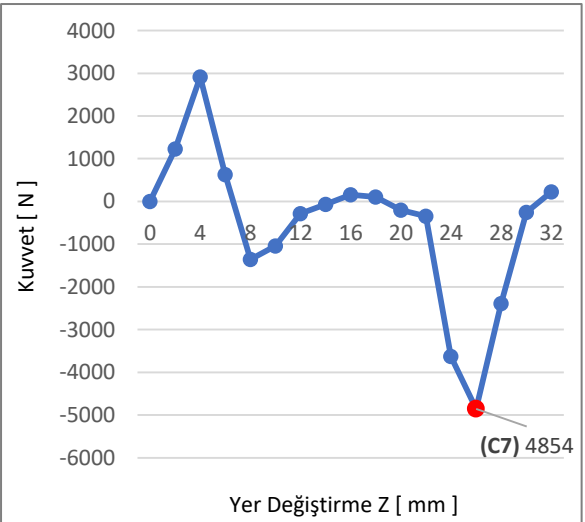
C5



C6



C7



**EK 14: ZRC [C] – YER DEĞİŞTİRME Z (GÖÇÜK) [MM] – ZAMAN [S]
GRAFİKLERİ**

