

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BALİSTİK AMAÇLI FİBER TAKVİYELİ POLİMER
MATRİKSLİ KOMPOZİTLER**

YÜKSEK LİSANS

Metalurji ve Malzeme Müh. Özlem MEMİŞ

Anabilim Dalı: Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Şeyda POLAT

KOCAELİ, 2009

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BALİSTİK AMAÇLI FİBER TAKVİYELİ POLİMER
MATRİKSLİ KOMPOZİTLER**

YÜKSEK LİSANS

Metalurji ve Malzeme Müh. Özlem MEMİŞ

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 29 Aralık 2008
Tezin Savunulduğu Tarih: 31 Mart 2009**

Tez Danışmanı
Yrd. Doç. Dr. Şeyda POLAT

(.....)

Üye
Yrd. Doç. Dr. İbrahim ÜNAL

(.....)

Üye
Doç. Dr. Ahmet KARAASLAN

(.....)

KOCAELİ, 2009

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Günümüz silah teknolojisine karşılık kara kuvvetlerini koruma amaçlı geliştirilen zırh malzemeleri arasında polimer matriksli fiber takviyeli kompozitler büyük bir gelişme göstermektedir. Uygulamaları arasında yaygın olarak yer alan cam fiber takviyesi ve reçine özelliklerinin nano boyutta kristalin elmas tozu katısı ile darbe dayanımı açısından etkisinin incelenmesi, balistik bir deneysel çalışma ile gerçekleştirilmiştir.

Fiber takviyeli polimer matriksli kompozitlerin balistik amaçlı kullanımı konusunda bana çalışma fırsatı veren KOÜ Metalurji ve Malzeme Bölüm Başkanı Sn. Prof. Dr. Şadi KARAGÖZ'e ve tez aşamasında fikirleri ile beni yönlendiren ve teşvik eden KOÜ Metalurji ve Malzeme Bölüm Başkan Yardımcısı Sn. Yrd. Doç. Dr. Şeyda POLAT'a teşekkürlerimi bir borç bilirim. Balistik plaka üretimin gerçekleştirildiği Kara Kuvvetleri Komutanlığı 7'nci Bakım Merkezi Komutanlığı'na (Tuzla) ve Sn. Üsteğmen Hilal Kemal ŞENYILMAZ'a, balistik testlerin gerçekleştirildiği Kara Kuvvetleri 8'nci Ana Bakım Merkezi Komutanlığı'na (Afyonkarahisar), bunun yanı sıra desteğini benden esirgemeyen Arş. Gör. Y. Müh. Onur BİRBAŞAR ve her zaman yanımda olan ve beni teşvik eden aileme sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

| | |
|---|------|
| ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR | i |
| İÇİNDEKİLER | ii |
| ŞEKİLLER DİZİNİ | iv |
| TABLolar DİZİNİ | vi |
| SİMGELER DİZİNİ ve KISALTMALAR | vii |
| ÖZET | viii |
| İNGİLİZCE ÖZET | ix |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 2. TAKVİYE MALZEMELERİ | 3 |
| 2.1. Giriş | 3 |
| 2.2. Aramid Fiber Takviye Malzemesi | 5 |
| 2.2.1. Moleküler yapı | 6 |
| 2.2.2. Aramid fiber üretimi | 8 |
| 2.2.3. Aramid ve ticari uygulamaların özellikleri | 10 |
| 2.3. Cam Fiber Takviye Malzemesi | 18 |
| 2.3.1. Cam fiber türleri ve şekilleri | 18 |
| 2.3.2. Üretim metodu | 20 |
| 2.3.3. Karakteristik malzeme özellikleri | 21 |
| 2.4. Kumaş Tipleri ve Yapıları | 23 |
| 2.4.1. Tek yönlü kumaşlar | 24 |
| 2.4.2. 0/90° kumaşlar | 24 |
| 2.4.3. Çok eksenli kumaşlar | 28 |
| 2.5. Nano Kristalin Elmas Toz Takviye Malzemesi | 30 |
| 2.5.1. Üretim metodu | 30 |
| 2.5.2. Malzeme yapısı | 33 |
| 3. MATRİKS MALZEMELERİ | 35 |
| 3.1. Reçine Sistemlerine Giriş | 35 |
| 3.1.1. Reçine sistemlerinin mekanik özellikleri | 36 |
| 3.1.2. Reçine sistemlerinin yapışma özellikleri | 37 |
| 3.1.3. Reçine sistemlerinin dayanım özellikleri | 37 |
| 3.1.4. Reçine sistemlerinin çevresel özellikleri | 38 |
| 3.2. Poliester Reçine Sistemi | 38 |
| 3.2.1. Kimyasal yapı | 38 |
| 3.2.2. Poliester reçine karışımı | 39 |
| 3.2.3. Kür mekanizmaları | 41 |
| 3.2.4. Mekanik özellikler | 42 |
| 3.2.5. Termal özellikler | 43 |
| 3.2.6. Kimyasal direnç | 43 |
| 3.3. Epoksi Reçine Sistemi | 43 |
| 3.4. Vinilester Reçine Sistemi | 46 |
| 3.4.1. Kimyasal yapı | 46 |
| 3.4.2. Kimyasal ve mekanik özellikler | 49 |
| 3.4.3. Diğer özelliklere genel bakış | 50 |

| | |
|--|-----|
| 3.4.4. Kür sistem ve bileşenleri..... | 50 |
| 4. VAKUM (DÜŞÜK BASINÇ) (REÇİNE) İNFÜZYON YÖNTEMİ | 52 |
| 4.1. Vakum İnfüzyon Yöntemine Giriş..... | 52 |
| 4.2. Vakum İnfüzyon Yönteminde Kullanılan Ekipmanlar ve Üretim Adımları..... | 53 |
| 4.2.1. Kalıp..... | 54 |
| 4.2.2. Reçine ve vakum yollarının belirlenmesi..... | 55 |
| 4.2.3. Vakum çantası ve reçine kanallarının bağlanması..... | 58 |
| 4.2.4. Vakum pompası | 58 |
| 4.2.5. İnfüzyon hazırlığı ile reçine seçimi..... | 58 |
| 4.2.6. Reçine infüzyonu | 59 |
| 4.3. Vakum İnfüzyon Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları..... | 60 |
| 4.4. Yöntemin Diğer Uygulamalar ile Karşılaştırılması | 61 |
| 5. BALİSTİK VE PERSONEL ZIRHLANMASI | 62 |
| 5.1. Giriş..... | 62 |
| 5.2. Personel Zırhlanma Standardı | 63 |
| 5.2.1. Standardın amaç ve kapsamı | 63 |
| 5.2.2. NIJ vücut zırh sınıflandırması..... | 64 |
| 5.2.3. Önemli tanımlar | 68 |
| 5.3. Balistik Deney Süreci..... | 70 |
| 5.4. Enerji Absorpsiyon Mekanizmaları | 73 |
| 6. DENEYSEL ÇALIŞMA | 76 |
| 6.1. Çalışmanın Amaç ve Kapsamı | 76 |
| 6.2. Kullanılmış olan Hammadde ve Yardımcı Malzemeler..... | 76 |
| 6.2.1. Vinilester reçine | 77 |
| 6.2.2. Cam fiber kumaş | 79 |
| 6.2.3. Nano kristalin elmas tozu..... | 80 |
| 6.2.4. %6'lık CoNap | 81 |
| 6.2.5. MEKP..... | 81 |
| 6.3. Balistik Plaka Üretim Süreci..... | 82 |
| 6.4. Balistik Testler | 86 |
| 6.5. Deneysel Çalışma Sonucu..... | 90 |
| 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER | 99 |
| KAYNAKLAR | 100 |
| ÖZGEÇMİŞ | 104 |

ŞEKİLLER DİZİNİ

| | |
|---|----|
| Şekil 1.1: 2000 yılına ait Avrupa polimer matriks kompozit piyasasına ait uygulama dağılımı [2]. | 2 |
| Şekil 2.1: Seçilmiş takviye edici fiberlerin spesifik özellikleri [3]. | 4 |
| Şekil 2.2: Para- ve meta-aramidlere ait yapısal formül [6]. | 7 |
| Şekil 2.3: Kristalin bölge içerisinde PPTA molekülleri arası hidrojen bağının şematik gösterimi [6]. | 8 |
| Şekil 2.4: PPD ve TCL bileşenleri [8]. | 9 |
| Şekil 2.5: Aramid fiber üretiminde kullanılan ıslak jet eğirme ve kurutma prosesi [9]. | 10 |
| Şekil 2.6: Hava ortamında Kevlar 49'un tipik bir termogravimetrik analiz sonucu (sıcaklık artışı 10°C/dak.) [7]. | 12 |
| Şekil 2.7: Nitrojen ortamında Kevlar 49'un tipik bir termogravimetrik analiz sonucu (sıcaklık artışı 10°C/dak.) [7]. | 12 |
| Şekil 2.8: Kevlar 29 ile Technora fiberlerin yüksek sıcaklıklardaki mukavemet değişimi [6]. | 13 |
| Şekil 2.9: Yüksek sıcaklığın Kevlar 29 çekme dayanımı üzerine etkisi [7]. | 13 |
| Şekil 2.10: Yüksek sıcaklığın farklı malzemelerin modülüne etkisi [7]. | 14 |
| Şekil 2.11: Sıcaklığın Kevlar 49'un spesifik ısısı üzerine etkisi [7]. | 14 |
| Şekil 2.12: Kevlar'ın hidrolitik stabilitesini gösteren grafik (154°C'de, farklı su buharı pH değerinde) [7]. | 16 |
| Şekil 2.13: Solar spektrum ile Kevlar'ın absorpsiyon spektrumun kesişme bölgesi [7]. | 17 |
| Şekil 2.14: Genel olarak sürekli cam fiber üretimine ait görsel açıklama [13]. | 21 |
| Şekil 2.15: 0/90° örgü tipleri [16]. | 25 |
| Şekil 2.16: 0/90° örgü tiplerinin devamı [16]. | 26 |
| Şekil 2.17: 'Örgü & Dikiş' yöntemi ile çok eksenli kumaş üretimi [16]. | 29 |
| Şekil 2.18: 'Eşzamanlı dikiş' yöntemi ile çok eksenli kumaş üretimi [16]. | 30 |
| Şekil 2.19: Karbon ile elmasa ait faz diyagramı ve patlama parametreleri [18]. | 31 |
| Şekil 2.20: Ergime noktası ile aşırı dağılmış elmas partikül boyutu arasındaki ilişki [19]. | 32 |
| Şekil 2.21: a) 7 nm çapında elmas nano küre görüntüsü, b) birçok, c) birkaç partikül ve d) dört nano elmasa ait nano difraksiyon paternleri [20]. | 34 |
| Şekil 2.22: Çapı 2 ile 8 nm arasında değişen ve çoğunlukla küresel şekiller gösteren HRTEM nano elmasa ait nano difraksiyon paternleri [21]. | 34 |
| Şekil 3.1: Genel olarak bir reçineye ait gerilme-gerinme diyagramı [16]. | 36 |
| Şekil 3.2: Farklı malzemelere ait gerilme-gerinme diyagramının karşılaştırılması [16]. | 37 |
| Şekil 3.3: Kür edilmemiş bir poliester reçinenin şematik gösterimi [16]. | 40 |
| Şekil 3.4: Kür edilmiş poliester reçinenin şematik gösterimi [16]. | 40 |
| Şekil 3.5: Basit bir epoksi (etilen oksit) grubunun idealize edilmiş kimyasal yapısı [16]. | 44 |
| Şekil 3.6: Tipik bir epoksiye ait idealize edilmiş kimyasal yapı [16]. | 45 |
| Şekil 3.7: Epoksi reçinenin şematik gösterimi (kür edilmiş 3D yapısı) [16]. | 45 |

| | |
|--|----|
| Şekil 3.8: Temel bir vinilester oluşum reaksiyonu (*benzil trimetil amonyum klorit katalizörü eşliğinde) [23]. | 47 |
| Şekil 3.9: Vinilester oluşum reaksiyonu [24]. | 48 |
| Şekil 3.10: Vinilester reçinenin (kür edilmemiş) şematik gösterimi [6]. | 48 |
| Şekil 3.11: Kür edilmiş vinilester reçine yapısının şematik gösterimi [6]. | 49 |
| Şekil 4.1: Vakum infüzyon yöntemi genel işleyişi [16]. | 52 |
| Şekil 4.2: Üretim adımları sonrası uygulamaya hazır bir parçanın enine kesiti (SCRIMP şeması) [27]. | 53 |
| Şekil 4.3: Reçine giriş yollarının tasarlanması ve peel ply kumaşın kullanılması [28]. | 55 |
| Şekil 4.4: Reçine ve vakum yollarının belirlenmesi [28]. | 56 |
| Şekil 4.5: İnfüzyon stratejileri: a) Nokta ve b) hat infüzyonu [29]. | 56 |
| Şekil 4.6: Deneysel çalışma sonucu nokta ve hat infüzyonun süresel karşılaştırılması [13]. | 57 |
| Şekil 4.7: Kompozit üretim teknolojisi [32]. | 61 |
| Şekil 5.1: Yuvarlak ve sivri uçlu ile 40 S&W FMJ [35, 36]. | 64 |
| Şekil 5.2: Jacketed Soft Point (JSP) kurşuna ait örnek [36]. | 65 |
| Şekil 5.3: Semi Jacketed Hollow Point (SJHP) [36]. | 65 |
| Şekil 5.4: Zırh delici kurşun [36]. | 66 |
| Şekil 5.5: Kurşun Geliş Açısı [34]. | 68 |
| Şekil 5.6: BFS değerlerinin ölçümü için örnek [34]. | 69 |
| Şekil 5.7: Test aralığı konfigürasyonu [34]. | 71 |
| Şekil 5.8: Fiber absorpsiyon mekanizmaları [1]. | 74 |
| Şekil 5.9: Fiber takviyeli polimer matriksli kompozitlerde enerji absorpsiyon mekanizmaları [1]. | 75 |
| Şekil 6.1: Sıcaklık, kobalt ve MEKP oranlarının değiştirilmesi ile jelleşme süresindeki değişim [38]. | 79 |
| Şekil 6.2: Kullanılmış olan cam fiber kumaşın fiber diziliminin gösterimi [39]. | 80 |
| Şekil 6.3: MEKP kimyasal formülasyonu [42]. | 81 |
| Şekil 6.4: Balistik plaka üretim akışı. | 82 |
| Şekil 6.5: Vakum infüzyon düzeneğinin hazırlanması (1) [43]. | 84 |
| Şekil 6.6: Vakum infüzyon düzeneğinin hazırlanması (2) [43]. | 85 |
| Şekil 6.7: Kısmi ve tam delinmeye ait şematik açıklama [45]. | 90 |
| Şekil 6.8: Nano boyutta elmas toz katkısı bulunmayan plakaya ait 16 atış sonrası ön ve arka görüntüleri ile 1 numaralı atıştan 4 numaralı atışlar arası plaka görüntüleri. | 92 |
| Şekil 6.9: Nano boyutta elmas toz katkısı bulunmayan plakaya ait 16 atış sonrası 5 numaralı atıştan 10 numaralı atışlar arası plaka görüntüleri. | 93 |
| Şekil 6.10: Nano boyutta elmas toz katkısı bulunmayan plakaya ait 16 atış sonrası 11 numaralı atıştan 16 numaralı atışlar arası plaka görüntüleri. | 94 |
| Şekil 6.11: %0.4 nano boyutta elmas toz katkılı plakaya ait 14 atış sonrası plaka ön ve arka yüzeylerine ait görüntüler ile 1 numaralı atıştan 4 numaralı atışlar arası plaka görüntüleri. | 96 |
| Şekil 6.12: %0.4 nano boyutta elmas toz katkılı plakaya ait 14 atış sonrası 5 numaralı atıştan 10 numaralı atışlar arası plaka görüntüleri. | 97 |
| Şekil 6.13: %0.4 nano boyutta elmas toz katkılı plakaya ait 14 atış sonrası 11 numaralı atıştan 14 numaralı atışlar arası plaka görüntüleri. | 98 |

TABLolar DİZİNİ

| | |
|---|----|
| Tablo 2.1: Fiber ve mühendislik malzemelerin temel mekanik özellikleri [4]. | 4 |
| Tablo 2.2: Yaygın olarak kullanılan aramid fiberlerin fiziksel ve termal özellikleri [6]. | 11 |
| Tablo 2.3: Farklı ticari aramid fiberlerin aksenal gerilim altındaki mekanik özellikleri [6]. | 15 |
| Tablo 2.4: Cam fiberlerin isimlendirilmesine ait örnek [4]. | 19 |
| Tablo 2.5: Cam fiberlerin isimlendirilmesinde kullanılan harflerin açıklamaları [3]. | 19 |
| Tablo 2.6: E-ve S-cam malzemelerinin kimyasal bileşimleri [12]. | 22 |
| Tablo 2.7: Fiber E-cam özelliklerin özetlenmesi [14]. | 23 |
| Tablo 2.8: Yaygın ticari uygulamaları olan fiberlerin karşılaştırılması [15]. | 23 |
| Tablo 2.9: Örgü tiplerine ait özelliklerin karşılaştırılması [16]. | 27 |
| Tablo 3.1: Poliester reçinelerin bazı mekanik özellikleri [12]. | 42 |
| Tablo 3.2: Genel amaçlı bir poliester sistemi için bazı termal özellikler [12]. | 43 |
| Tablo 5.1: Standart özet tablosu [34]. | 67 |
| Tablo 6.1: Sıvı reçinenin genel özellikleri [38]. | 77 |
| Tablo 6.2: Cam fiber ile takviyelendirilmiş, sertleşmiş reçinenin mekanik özellikleri [38]. | 77 |
| Tablo 6.3: Test plakaların ölçü ve ağırlık açısından değerlendirilmesi. | 91 |
| Tablo 6.4: Balistik test sonuçları (nano elmas toz katkısı bulunmayan plaka). | 91 |
| Tablo 6.5: Balistik test sonuçları (%0.4 nano elmas toz katkılı plaka). | 95 |

SİMGELER DİZİNİ ve KISALTMALAR

Simgeler

| | |
|-----------------|--------------------------|
| P | : Basınç |
| T | : Sıcaklık |
| T _g | : Camı geçiş sıcaklığı |
| B | : Molekül reaktif tarafı |
| S | : Stiren |
| V ₅₀ | : Balistik limit |
| I | : Tepki |
| T | : Süre |
| F(t) | : Süreye bağlı kuvvet |
| ε | : Gerinme |
| V | : Çarpma hızı |
| c | : Fiber ses hızı |
| E | : Elastik modül |
| ρ | : Fiber yoğunluğu |

Kısaltmalar

| | |
|---------|--|
| US FTC | : US Federal Trade Commission |
| PPTA | : Poly-p-phenylene terephthalamide |
| PBIA | : Poly-p-phenylene-benzimidazole-terephthalamide |
| MPIA | : Poly-m-phenylene isophthalamide |
| SVM | : Kaiser firmasına ait aramid fiber ticari ismi |
| PPD | : Paraphenylene diamine |
| TCL | : Terephthaloyl chloride |
| TNT/RDX | : Trinitrotoluen/hekzojen |
| UDD | : Ultradispersed Diamond |
| STEM | : Scanning transmission electron microscopy |
| HRTEM | : High resolution transmission electron microscopy |
| SCRIMP | : Seemann composites resin infusion moulding process |
| RIFT | : Resin infusion under flexible tooling |
| VARTM | : Vacuum assisted resin injection moulding |
| LRI | : Liquid resin infusion |
| FMJ RN | : Full Metal Jacketed Round Nose |
| JSP | : Jacketed Soft Point |
| SJHP | : Semi Jacketed Hollow Point |
| BFS | : Backface Signature |
| BL | : Ballistic Limit |
| P-BFS | : Perforation and Backface Signature Test |
| MEKP | : Metil-Etil-Keton-Peroksit |
| DOP | : Depth of penetration/Delme derinliği |
| PBL | : Protection ballistic limit/Balistik koruma limiti |

BALİSTİK AMAÇLI FİBER TAKVİYELİ POLİMER MATRİKSLİ KOMPOZİTLER

Özlem MEMİŞ

Anahtar kelimeler: Balistik, Cam Fiber, Reçine, Vinilester, Vakum İnfüzyon

Özet: Bu çalışmanın amacı, fiber takviyeli polimer matrisli kompozitlerin özellikle balistik uygulamalardaki performansının ve gelişiminin, teorik olduğu kadar deneysel çalışmaların eşliğinde incelenmesi ve sonuç olarak günümüz balistik uygulamalarına yönelik ihtiyaç duyulan bir malzemenin tasarlanmasıdır. Bu amaç doğrultusunda takviye malzemesi olarak cam fiber, matris malzemesi olarak da bir termoset polimer olan vinilester seçilerek, vakum infüzyon yöntemiyle kompozit malzemenin üretimi ele alınmıştır. Bu girdilerin ayrı ayrı malzeme özellikleri incelenerek, ortak kullanımları ile oluşturulmuş olan kompozit malzemenin balistik deneyi gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmaların sonuçları değerlendirilerek balistik uygunluk doğrulanmıştır.

FIBER REINFORCED POLYMER MATRIX COMPOSITES FOR BALLISTIC APPLICATIONS

Özlem MEMİŞ

Keywords: Ballistic, Fiber Glass, Resin, Vinylester, Vacuum Infusion

Abstract: The aim of this study is to investigate the performance and development of fiber reinforced polymer matrix composites in ballistic applications from both theoretical and experimental points of view and to design a material to meet the present day requirements. For this purpose, vacuum infusion technique is used to produce a composite material where a thermoset polymer, namely vinylester is chosen as matrix and glass fiber is used as reinforcement. The properties of the input materials are examined and ballistic tests are performed on the composite material. Evaluation of the experimental data revealed acceptable results for ballistic qualification.

1. GİRİŞ

Askeri sistemler, özellikle kara kuvvetlerini destekleyenler, daha hızlı, daha çevik ve daha mobil olmaya yönelik gelişmektedir. Bunun bir sonucu olarak, gelişmiş hafif vücut zırhı ve hafif araç zırhı talebi, yeni zırh malzemelerin gelişmesine neden olmuştur. Yüksek performans fiber malzemelerinden, her iki uygulama için de faydalanılmaktadır. Örneğin yumuşak, esnek fiber kumaşları olarak vücut zırhlanması veya rijit polimer matriks kompozitlerinde takviye malzemesi olarak hafif araç zırhlanmasında kullanılabilir [1].

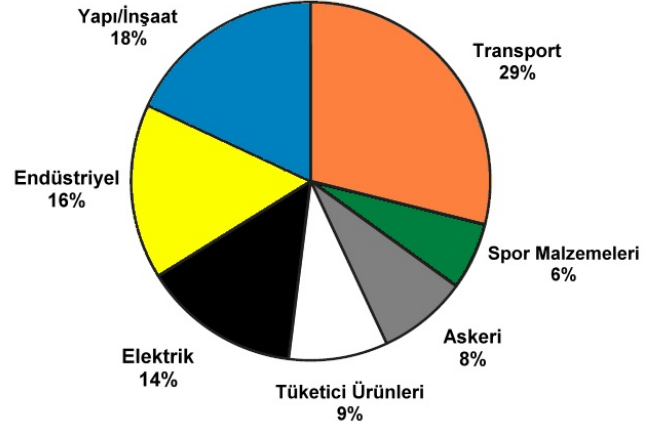
Tüm tarihsel gelişme boyunca hafif ve esnek malzemeler araştırılarak, daha hafif vücut zırh sistemleri ile mobilitayı artırmak ve aynı zamanda belirli tehditlere karşı koruma sağlanması hedeflenmiştir. Bu amaçla ilk malzemeler arasında deri ve hatta ipek metal plakalar ile birlikte kullanılarak, ihtiyaç duyulan korumaya ulaşılmaya çalışılmıştır [1].

Metallerin tamamen vücut zırh sistemlerinden kalkması, Kore savaşına kadar gerçekleşmemiştir. Bu noktada, ikinci dünya savaşı süresince geliştirilmiş olan, bir naylon kumaş yelek ve bir E-cam fiber/etil selüloz kompozit yelek, kullanıma alınmıştır. Bu yelekler bomba ve parçaların neden olduğu yaralanma ve ölümlerin büyük bir kısmına karşı koruma sağlamıştır [1].

Naylon ve E-cam fiberler, düşük maliyetlerinden ötürü, günümüzde hala bazı uygulamaları bulmasına rağmen, yüksek performans fiberleri, bir çok fiber takviyeli zırh uygulamaları için standart haline gelmiştir. Yüksek performans fiberleri tipik olarak örülmüş kumaş halinde yelekler, örülmüş veya örülmemiş olarak polimer matriks kompozitlerinde takviye malzemesi halinde başlık amaçlı kullanılabilir [1].

Metaller, uçaklardaki zırh amaçlı kullanımı için engelleyici bir şekilde ağır olduklarından, polimer matriksli kompozitler dikkate alınmaktadır. Aynı şekilde bu zırh teknolojisi kara araçlarına da yönlendirilmiştir [1].

Buna ilave olarak Şekil 1.1 Avrupa piyasasında polimer matriksli kompozitlerin, zırhlanma amaçlı kullanımının yanı sıra diğer uygulama alanlarına ait de bir fikir vermektedir [2].



Şekil 1.1: 2000 yılına ait Avrupa polimer matriks kompozit piyasasına ait uygulama dağılımı [2].

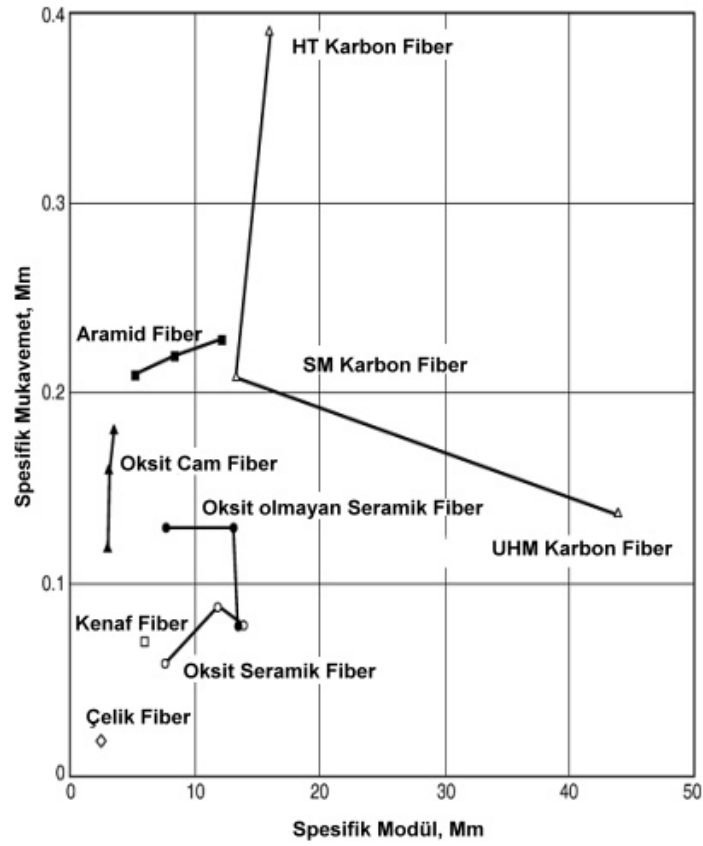
2. TAKVİYE MALZEMELERİ

2.1. Giriş

Takviye edici fiberler polimer matriks kompozitlerin bir anahtar bileşenidir. Matrikse yüksek mukavemet ve rijitlik sağlayarak, ilave olarak düşük dielektrik sabit, yüksek sıcaklık dayanımı veya yüksek sürünme direnci gibi değerli özelliklerin gelişmesine katkıda bulunurlar [3].

Takviye edici fiberler kimyasal kompozisyonlarına, yapısal morfolojilerine ve ticari fonksiyonlara göre sınıflandırılabilirler. Kenaf gibi doğal fiberler bitkilerden elde edilerek hemen hemen sadece polimer matriksli kompozitlerde tercih edilmektedir. Oksit cam fiberler oksit, silika veya kuvarz karışımlarından elde edilerek, amorf yapıda olup birincil olarak termoplastik ve termoset polimer matriksli kompozitlerde kullanılırlar. Aramid fiberler ise kristalin polimer fiberler olup çoğunlukla polimer matriksli kompozitlerin takviyelendirmesinde tercih edilirler. Bunlara benzer çok sayıda fiber malzemeleri sıralamak mümkündür. Bunlardan özellikle aramid ile cam fiber malzemeler ileriki bölümlerde daha ayrıntılı anlatılacaktır [3].

Şekil 2.1'de bazı fiber malzemeleri spesifik mukavemet ve modüller açısından karşılaştırmalı olarak verilmiştir [3].



Şekil 2.1: Seçilmiş takviye edici fiberlerin spesifik özellikleri [3].

Tablo 2.1’de ise yaygın olarak kullanım bulan belirli fiber malzemeler çeşitli mühendislik malzemeleri ile mekanik özellikleri açısından karşılaştırılmıştır [4].

Tablo 2.1: Fiber ve mühendislik malzemelerin temel mekanik özellikleri [4].

| Malzeme | Çekme Mukavemeti (MPa) | Young Modülü (GPa) | Yoğunluk (g/cm ³) |
|-----------------|------------------------|--------------------|-------------------------------|
| Karbon HS | 3500 | 160-270 | 18 |
| Karbon IM | 5300 | 270-325 | 18 |
| Karbon HM | 3500 | 325-440 | 18 |
| Karbon UHM | 2000 | 440 | 20 |
| Aramid LM | 3600 | 60 | 145 |
| Aramid HM | 3100 | 120 | 145 |
| Aramid UHM | 3400 | 180 | 147 |
| E-Cam | 2400 | 69 | 25 |
| S-2 Cam | 3450 | 86 | 25 |
| Kuvarz | 3700 | 69 | 22 |
| Aluminyum | 130-280 | 72 | 2.8 |
| Titanyum | 250-400 | 105 | 4.5 |
| Çelik | 275-460 | 205 | 7.8 |
| Paslanmaz Çelik | 206-520 | 196 | 7.9 |

Yüksek performanslı fiber polimer ile kombine edildiğinde, geliştirilmiş mekanik özelliklere sahip bir kompozit yapı elde edilmiş olur. Kompozit yapıya dışarıdaki bir kaynaktan uygulanan gerilim, fiber-matriks arayüzeyinden fiberlere iletilmektedir (yük taşıyan bileşendir) ve bu gerilimin transfer mekanizması ile onu takip eden takviye etkisi aşağıdaki şekilde açıklanabilmektedir. Durum fiberlerin kısa veya uzun (sürekli veya süreksiz) olması doğrultusunda değişecektir [5].

Bir çok gelişmiş uygulama alanında kullanılan kompozitler (havacılık gibi) normalde, lamine yapının şekillendirildiği uzun (veya sürekli) fiberler içerir. Fiberler daha matriksten daha rijit olduğunda mükemmel arayüzey bağına sahip bir fiber matriks ikilisi ile yükleme durumunun fiber düzenine paralel olduğu ve böylece yük transferinin fiberlere yükleme mekanizması ile iletildiği varsayılarak, kompozit içerisinde uniform bir gerilim dağılım alanının oluşturulduğu ile sonuçlanmaktadır [5].

2.2. Aramid Fiber Takviye Malzemesi

Aramid fiberler, 1970'lerin başlangıcında ilk ticari tanışıklıkları gerçekleştiğinde, mevcut olan diğer tüm ticari takviye malzemeleri arasında, en yüksek mukavemet – ağırlık oranı üstünlüğüne sahiptiler. E.I. Du Pont de Nemours & Company tarafından, Kevlar ticari ismi altında üretilen ilk aramid fiberlerin, öncelikli olarak araç lastiği ve plastiklerin takviyesinde kullanılması amaçlanmıştı. Düşük ağırlık, yüksek mukavemet ve yüksek sertlik gibi özellikleri kompozit, balistik, araç lastiği, kablo, halat, yanmaz malzemelerin yerine kullanımı ve koruyucu giysi gibi uygulamaların gelişmesine neden olmuştur. Bu günlerden sonra diğer para-aramid fiberler, Accordis BW tarafından Twaron, Teijin tarafından Technora ve bir çok çeşit Kevlar fiberler de dahil olmak üzere geliştirilmiştir [3].

1960 ve 70'lerde ilk aramid fiberler geliştirilmeden önce organik fiberler oldukça düşük performans malzemeleriydi ve temelde tekstil alanında uygulamaları vardı. Günümüzde çok sayıda farklı tip yüksek performans organik fiberleri mevcut olmakla birlikte hepsi de inorganik fiberlerin bazı veya hatta çoğu özellikleri ile yarışabilecek ölçüdedir [6].

Yüksek performanslı organik fiberlerin günümüzdeki temel uygulama alanlarını asbestos (yanıcı olmayan madde) yerine kullanımı, balistik, kauçuk takviyesi olarak, halat, kablo ve kompozit oluşturmaktadır [6].

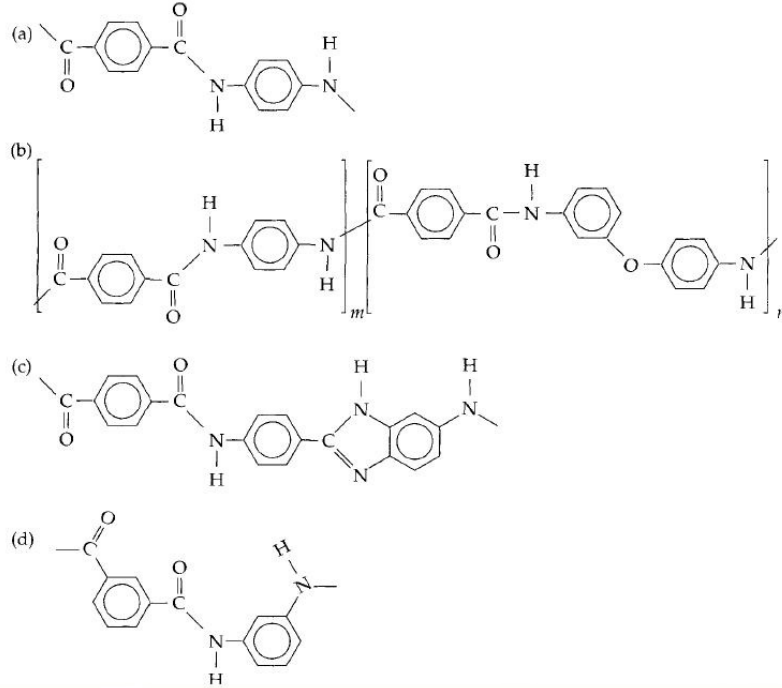
DuPont Kevlar aromatik poliamid ailesinde organik bir fiberdir. Tüm aromatik poliamid ailesinin (aramidler) eşsiz özellikleri ve kimyasal kompozisyonu onları diğerlerinden ve özellikle Kevları diğer ticari insan yapımı fiberlerden, ayırmaktadır. Kevlar, yüksek mukavemet, yüksek modül, sertlik ve termal stabiliteden oluşan eşsiz bir kombinasyona sahiptir (bu gelişmiş malzeme özelliklerin temelinde, polimer moleküllerinin genişlemiş zincir yapısı ile hemen hemen mükemmel olan kristal paket yapısı yatmaktadır). Günümüzde geniş bir kullanım talebini karşılamak üzere bir çok çeşit Kevlar üretilmektedir [7].

2.2.1. Moleküler yapı

Aramid fiber, spesifik olan bir çeşit “aromatik poliamid fiber” için genel bir terimdir. Amerika Federal Ticaret Komisyonu (US FTC, US Federal Trade Commission) bir aramid fiberi, “fiberi oluşturan maddenin, içerisinde aramid bağlarının en az 85%'inin doğrudan iki aromatik halkaya bağlanmış olan, uzun bir sentetik zincir poliamid'den üretilen fiber” olarak tanımlamaktadır. Aramidlerin, naylonlar ve diğer geleneksel poliamidlerden (ki bunlarda mevcut olsa dahi, polimer ana zincirde az miktarda aromatik gruplar bulunmaktadır) oldukça farklı özelliklere sahip olması şaşırtıcı değildir [6].

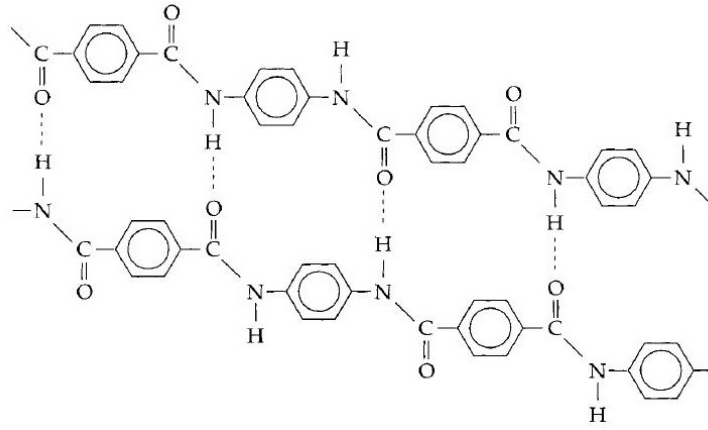
Aramid fiberler iki gruba ayrılabilir: para-aramidler ve meta-aramidler. Para-aramidlerde, zinciri uzatan (genişleten) bağlar, poly-p-phenylene terephthalamide (PPTA) (Şekil 2.2.a), co-poly-p-phenylene/3,4'-oxydiphenylene terephthalamide (Şekil 2.2.b) ve poly-p-phenylene-benzimidazole-terephthalamide'de (PBIA) (Şekil 2.2.c) olduğu gibi, aromatik halkalar üzerinde para-pozisyondadır. Diğer taraftan meta-aramidlerde, zinciri uzatan (genişleten) bağlar, poly-m-phenylene isophthalamide'de (MPIA) (Şekil 2.2.d) olduğu gibi aromatik halka üzerinde meta-pozisyondadır [6].

Ticari olarak mevcut olan para-aramidler DuPont'un Kevlar'ını, Akzo'nun Twaron'u, Teijin'in Technora'sını ve Kaiser'in Armos ile SVM fiberlerini kapsarken, meta-aramidler DuPont'un Nomex ve Teijin'in Teijinconex fiberlerini kapsamaktadır. Hoechst AG'de Avrupa piyasası için bir para-aramid fiber üretmektedir. Para-aramidler yüksek performans uygulamalarında tercih edilen fiberlerdir [6].



Şekil 2.2: Para- ve meta-aramidlere ait yapısal formül [6].

Para-aramidlerin mükemmel özellikleri hem kimyasal hem de fiziksel mikro yapısından kaynaklanmaktadır. Hem meta- hem de para-aramidlerde, ana zincirdeki aromatik halkalar yüksek termal dayanım oluşturmaktadır. İlave olarak para-aramidlerde zincir genişletici bağların oryantasyonu, rijit bir dallanmış zincir polimeri oluştururlar. Eğirme işlemi ile, çekme yönü ve birbirleri ile nerdeyse tamamen paralel olarak sıralanmış olan, genişlemiş kristalin zincir fiberleri oluşturulmaktadır. Kristalin yapılar yüksek bir boy-çap oranına sahiptir ve bu kristalin bölgeler arası uzun bağlantılı moleküller oluştururlar. Böylece kopmamış sınırsız elyaf oluşturulabilmektedir. Kristalin bölge içerisinde zincirler birbirine hidrojen bağlarla bağlanmıştır (Şekil 2.3) [6].



Şekil 2.3: Kristalin bölge içerisinde PPTA molekülleri arası hidrojen bağının şematik gösterimi [6].

Ancak buna rağmen bu bağlar, molekül içi meydana gelen kovalent bağlar kadar güçlü olamamaktadır. Moleküller rijit olduğundan onları gerilim altında ayırmanın tek yolu tüm hidrojen bağlarını bir kerede kırmaktır. Bu büyük bir güç gerektirir ve para-aramid fiberlerin aksel gerilim altında bu kadar güçlü olmasının nedenini oluşturmaktadır. Fakat bağlar bir kerede kolayca kırılabildiğinden, fiberler bükülme, burulma ve çapraz yükler altında zarar görmeye karşı oldukça hassastırlar [6].

2.2.2. Aramid fiber üretimi

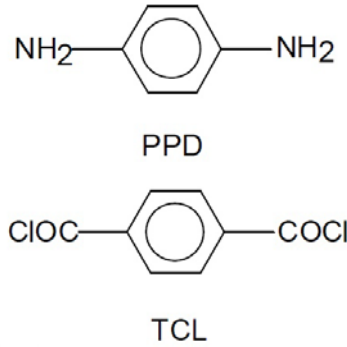
Tarihsel olarak, meta-aramid fiberleri, DuPont'un Nomex fiberleri olarak, 1960'larda tanıtılan ilk fiberlerdir. İlk para-aramidler 1965'de DuPont'dan S.L. Kwolek tarafından sentezlenmiştir. Bunların kullanılabilir fiberler olarak şekillendirilmesi oldukça zordur, çünkü para-aramidler bir ergime noktası göstermeyerek sınırlı sayıda solvent içerisinde çözülebilmektedir [6].

Polimerin fiber olarak eğirilmesi için, PPTA içerisinde çözülerek, akabinde polimerin sıvı kristalin çözelti oluşturmak üzere kuvvetli asitler içerisinde eritilmesi gerekmektedir. Genel olarak saf sülfürik asit, solvent olarak kullanılmaktadır. 1973-72'de Blades sıvı kristalin solüsyonu fibere dönüştürmek için -ıslak jet eğirme ve sürekli kurutma olarak bilinen (continuous dry-jet wet spinning)- özel bir üretim prosesi tasarlamıştır. Polimer solüsyonu eğiriciler yardımıyla, yüksek sıcaklıklarda ekstrude edilerek bir hava katmanından koagüle edici (coagulating) su banyosundan geçmektedir [6].

Islak jet eğirme ve sürekli kurutma tekniği çoğu para-aramid fiberlerin üretiminde kullanılan bir yöntemdir. Fakat örneğin Teijin'in Technora fiberi, ıslak eğirme ve çekme ile üretilmektedir [6].

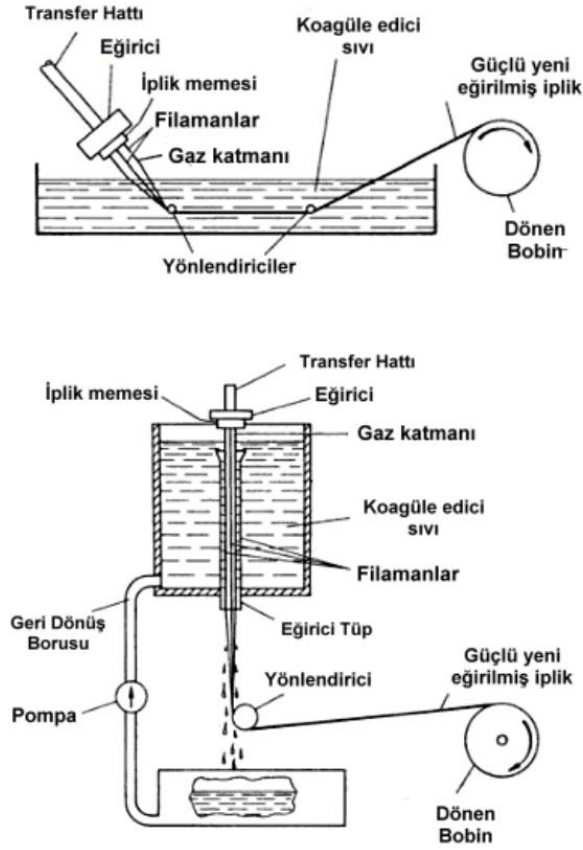
Sıvı kristalin polimer solüsyonları kesme kuvvetleri altında benzersiz bir davranış sergilemektedir. Bu eşsiz durum fiber üretim ve işlenmesine yeni bir boyut kazandırmıştır. Solüsyon bir eğiriciden geçtiği sırada maruz kaldığı kesme kuvvetleri altında, rastgele oryente olmuş alanlar tamamıyla kesme yönü ile oryente hale gelerek hemen hemen mükemmel moleküler oryantasyona sahip olarak elde edilirler [7].

Günümüzdeki uygulamasına yönelik açıklama getirmek gerekirse, aramid üretimi için temel bileşenleri paraphenylene diamine (PPD) ile terephthaloyl chloride (TCL) (Şekil 2.4) bir dialkil amid çözeltisi içinde kondensasyon reaksiyonu şeklinde gerçekleşmektedir [8].



Şekil 2.4: PPD ve TCL bileşenleri [8].

Aramid fiber üretiminde Şekil 2.5'de görülen ıslak jet eğirme ve kurutma prosesi düzeneğinde, anizotropik aramid çözeltileri eğirilmektedir [8].



Şekil 2.5: Aramid fiber üretiminde kullanılan ıslak jet eğirme ve kurutma prosesi [9].

Özet olarak aramid fiberler, sıvı bir kimyasal karışımdan katı bir fiberin eğirilmesi şeklinde oluşturulmaktadır. Amid gruplarına ait hidrojen bağlarının yerleştirilmesi için iyonik komponent (kalsiyum klorid) içerikli bir co-solvent ve aromatik polimeri çözmek için ise organik bir solvent (n-methyl pyrrolidone) kullanılmaktadır [10].

2.2.3. Aramid ve ticari uygulamaların özellikleri

Aramid fiberler diğer fiberlere karşı önemli avantajları olmasına rağmen, bazı sınırlandırmaları da mevcuttur. Hem DuPont'un fiber Kevlar ailesi hem de Akzo'nun Twaron fiberleri Şekil 2.2.a.'da sunulmuş olan PPTA yapısına dayanmaktadır. Diğer taraftan Teijin'in Technora fiberi ve Avrupa'daki Hoest AG para-aramid piyasası, Şekil 2.2.b'de sunulmuş olan ve bir para-aramid kopolimer olan co-poly-p-phenylene/3,4'-oksidiphenylene terephthalamide'dir. Kaiser'in SVM fiberleri poly-p-phenylene-benzimidazole-terephthalamide (PBIA, Şekil 2.2.c) ve Kaiser'in Armos fiberi ise PBIA veya PPTA olabilmektedir. DuPont'un Nomex'i ile Teijin'in

Teijinconex fiberleri MPIA'ya (Şekil 2.2.d) dayanmakta olup kaynakça çalışması içerisinde daha çok Kevlar fiber (para-aramidler) çeşitleri ile özellikleri üzerinde durulmaktadır. Bu kimyasal ve yapısal farklılıklar, fiberlerin çeşitli özelliklere sahip olmasına neden olmaktadır. Örneğin prosesleme koşullarının değiştirilmesi ile, elastisite modülü 63 ile 143 GPa arasında ve kopma uzaması 1.5'den 4.4 % arasında değişen Kevlar fiberler üretilebilmektedir [6].

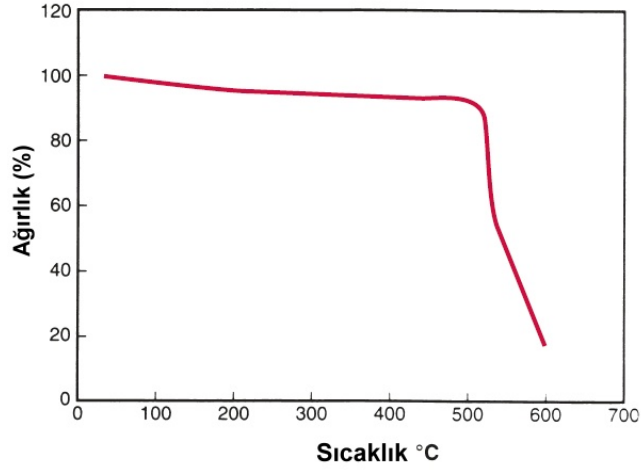
Mikroyapının anizotropisi nedeniyle, para-aramid fiberler anizotropik mekanik, termal, fiziksel ve diğer özelliklere sahiptirler. Bu anizotropi tasarım sınırlandırmaları oluşturabileceği gibi avantaj da sağlayabilmektedir [6].

Tablo 2.2 yaygın olarak kullanılan bazı aramid fiberlerin fiziksel ve termal özelliklerini özetlemektedir. Yüksek aromatik ve düzenli yapısına uygun olarak, aramidler organik malzemeler olarak çok yüksek termal dayanıma sahiptirler. Teknik açıdan termoplastik olarak sınıflandırılmalarına rağmen ayrışma öncesi ergimezler (başka bir deyişle ergimez, ayrışırlar. Buna rağmen, ayrışma nedeniyle, ısı dayanımları inorganik fiberlerinkine denk değildir. Kevlar fiberlerin termogravimetrik analizleri, ağırlık kaybının hava ortamında 350°C üzerinde başladığı ve 427 ile 482°C arasında tamamen ayrışması ile sonuçlandığını göstermektedir [6].

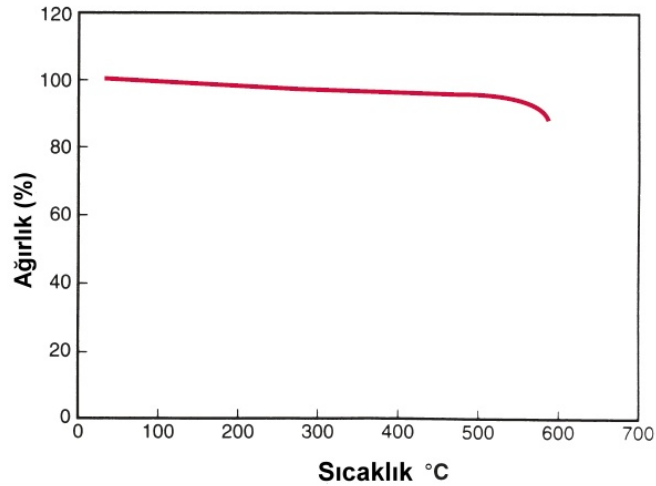
Tablo 2.2: Yaygın olarak kullanılan aramid fiberlerin fiziksel ve termal özellikleri [6].

| Fiber | Kevlar 49 | Twaron | Technora |
|--|-------------|-------------|-------------|
| Tip | Para-aramid | Para-aramid | Para-aramid |
| Üretici | Du Pont | Akzo | Teijin |
| Yoğunluk (g/cm ³) | 1.44 | 1.45 | 1.39 |
| Ergime Sıcaklığı (°C) | ~538 | >500 | - |
| Ayrışma Sıcaklığı (havada; °C) | 427-482 | 500 | 500 |
| Boylamsal Termal Genleşme Katsayısı (10 ⁻⁶ /°C) | -4.9 | -3.5 | -6.2 |
| Enine Termal Genleşme Katsayısı (1/°C) | +66 | - | - |
| Spesifik Isı (kJ/kg K) | 1.42 | 1.42 | 1.09 |
| Boylamsal Termal İletkenlik (10 ⁻² W/m K) | 4.11 | 4.0 | - |
| Enine Termal İletkenlik (10 ⁻² W/m K) | 4.82 | 5.0 | - |
| Denge durumunda Nem (%) | 3.5 | 3.5 | 2.0 |

Dekompozisyon sıcaklıkları sıcaklık artış oranı (hızı) ve maruz bırakılma süresi ile değişmektedir. Şekil 2.6 ve 2.7’de Kevlar 49’un sırasıyla hava ve nitrojen ortamlarındaki termogravimetrik analiz sonuçları görülmektedir. Kevlar için sıcaklığın artmasıyla birlikte, su kaybına karşılık gelen ortalama bir ağırlık kaybı söz konusu olmaktadır. Eğri ayrışma reaksiyonuna kadar oldukça düz kalarak, ayrışma ile birlikte önemli bir ağırlık kaybı gözlemlenmektedir [7].

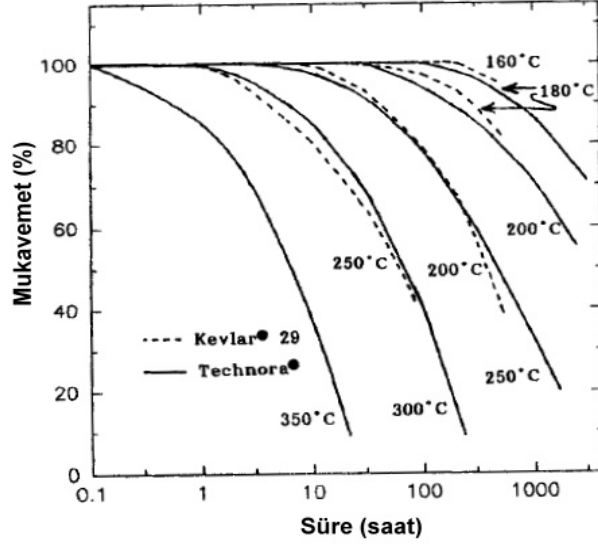


Şekil 2.6: Hava ortamında Kevlar 49’un tipik bir termogravimetrik analiz sonucu (sıcaklık artışı 10°C/dak.) [7].



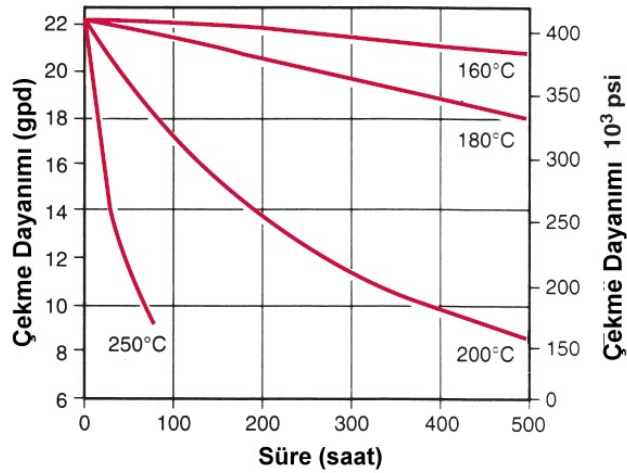
Şekil 2.7: Nitrojen ortamında Kevlar 49’un tipik bir termogravimetrik analiz sonucu (sıcaklık artışı 10°C/dak.) [7].

Aramid fiberlerin yüksek sıcaklıklara maruz bırakılması, özelliklerinin olumsuz etkilenmesine neden olmaktadır. Şekil 2.8 Kevlar 29 ile Technora fiberlerin dayanım değişimlerini sıcaklığın ve zamanın fonksiyonu olarak göstermektedir. Özelliklerdeki bu değişim, yavaşça gerçekleşen oksidasyonun bir sonucudur. Bu nedenle para-aramidlerin uzun süreli kullanımda sıcaklıklar 150-175°C ile sınırlanmıştır [6].

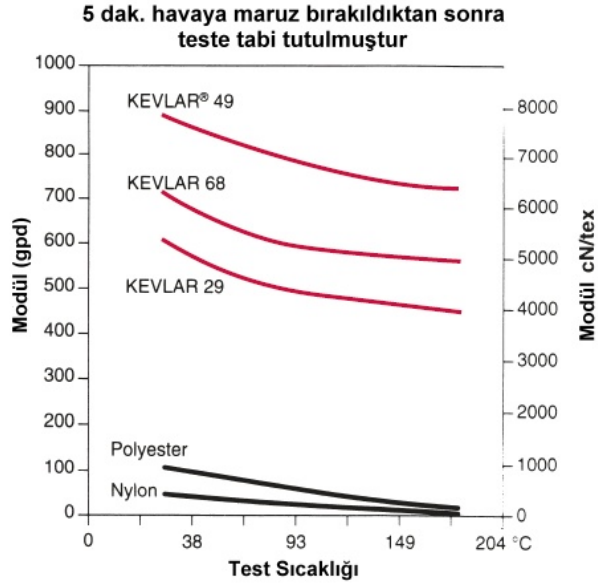


Şekil 2.8: Kevlar 29 ile Technora fiberlerin yüksek sıcaklıklardaki mukavemet değişimi [6].

Şekil 2.9 ve 2.10'da sırasıyla Kevlar ve farklı malzemelerin yüksek sıcaklığa maruz bırakılması sonucu çekme dayanımı ve modüle etkilerini göstermektedir [7].



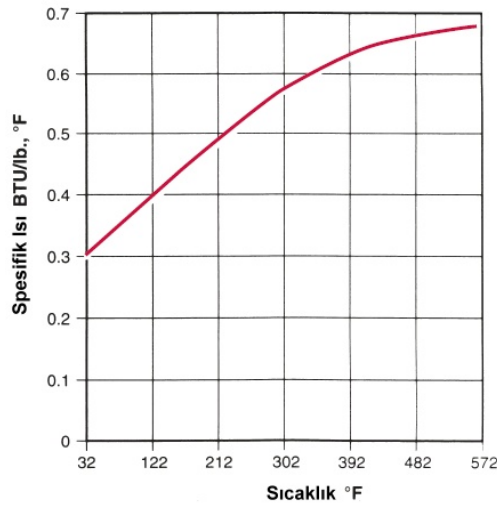
Şekil 2.9: Yüksek sıcaklığın Kevlar 29 çekme dayanımı üzerine etkisi [7].



Şekil 2.10: Yüksek sıcaklığın farklı malzemelerin modülüne etkisi [7].

Diğer malzemelerde olduğu gibi yüksek sıcaklıklarda para-aramidler enine doğru genişler. Buna karşılık, sıcaklığın artması ile birlikte fiberler uzunlamasına büzülür. Para-aramidlerin bu negatif termal genişleme katsayısı, kompozitlerin tasarımında avantaj olarak kullanılabilir [6].

Kevlar'ın spesifik ısısı önemli derecede sıcaklıktan etkilenmektedir. Sıcaklık 572 °F 'ye çıktığında spesifik ısı iki katından daha büyük bir değere çıkmaktadır (Şekil 2.11) [7].



Şekil 2.11: Sıcaklığın Kevlar 49'un spesifik ısısı üzerine etkisi [7].

Aramidler yanmaya dirençlidir ancak yine de tutuşturulabilmektedir. Kevlar tozu veya özü dumansız olarak yanarken, kumaş alev kaynağı uzaklaştırılsa dahi yanmaya devam etmektedir. Aramidlerin daha düşük olan termal iletkenliği inorganik fiberler ile karşılaştırıldığında, aramidler ısıyı daha uçucu olan matrikse kolayca iletmediklerinden, oluşturdukları kompozitlerin yanma direncini arttırabilmektedirler [6].

Kompozit malzemelerin kullanımı, diğer malzemeler ile karşılaştırıldığında, veri bir ağırlık için, büyük ölçüde mükemmel dayanım ve/veya rijitlik gibi özellikleri nedeniyle tercih edilmektedir [6].

Tablo 2.3’de ticari olarak kullanım bulan çeşitli aramid fiberlerin aksel gerilim altında elde edilmiş olan mekanik özellikleri verilmektedir [7].

Tablo 2.3: Farklı ticari aramid fiberlerin aksel gerilim altındaki mekanik özellikleri [6].

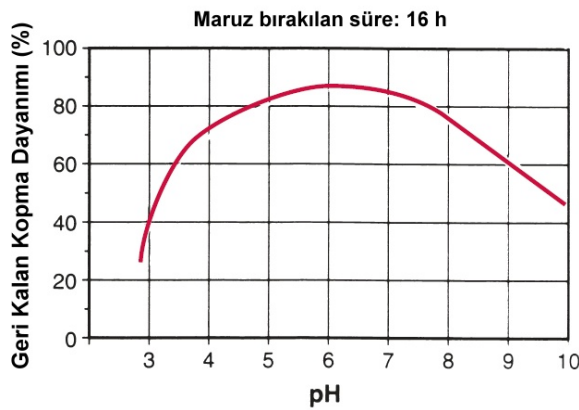
| Fiber | Modül (GPa) Sade | Modül (GPa) Epoksi Emdirilmiş | Çekme Dayanımı (MPa) Sade | Çekme Dayanımı (MPa) Epoksi Emdirilmiş | Kopma Uzaması (%) Sade |
|-------------------------|-------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|---|-------------------------------|
| Kevlar 29 Tip 964 | 70.5 | 83.0 | 2920 | 3600 | 3.6 |
| Kevlar 49 Tip 965 | 112.4 | 124.0 | 3000 | 3600 | 2.4 |
| Kevlar 129 | 96.0 | - | 3380 | - | 3.3 |
| Kevlar 149 Tip 965 A | 142.7 | - | 2340 | - | 1.5 |
| Kevlar KM2 | 63.4 | - | 3280 | - | 4.0 |
| Twaron Tip 2000 | 88 | - | 3230 | - | 3.3 |
| Technora | 73 | - | 3440 | - | 4.6 |

Aramid fiberlerin, daha önce de bahsedildiği gibi, belirli bazı sınırlamaları vardır. Bükülme konusunda zayıflar ve çevirmeye veya burkulmaya maruz kaldıklarında zarar görebilmektedirler. Bunun bir sonucu olarak baskıya (mikro burulmanın yer aldığı) veya çapraz gerilime (hidrojen bağlarının kırıldığı) maruz kaldıklarında da zarar görürler [4].

Buna ilave olarak, para-aramid zinciri doğasında oldukça polar olmasına rağmen, hemen hemen tüm polar gruplar diğer aramid molekülleri ile hidrojen bağ oluşturmaktadırlar. Bunun bir sonucu olarak ise, para-aramid fiberler, kompozitlerin matriksleri gibi diğer malzemelerle kuvvetli bağlar oluşturmazlar [4].

Technora co-polimer fiber ana zincirde yer alan eter (-O-) bağı, PPTA temelli Kevlar ve Twaron'dan daha düşük bir modül oluşturmaktadır. Buna rağmen, ısı işlemler ve diğer üretim adımları ile, çeşitli Kevlar fiberlerin özellik farklılıklarından görülebileceği gibi, mekanik özellikleri de önemli derecede değiştirilebilmektedir [6].

Kevlar kuvvetli asit ve bazlara maruz bırakıldığında bozunuma uğrayabilmektedir. Nötral pH (pH 7) ortamında, 65°C sıcaklıkta 200 gün bekletilen filaman, direnci görsel olarak aynı durumdadır. Filaman direnci, pH değerinin 7'den uzaklaşması ile orantılı olarak düşmektedir. Aynı davranış, farklı pH seviyelerinde sudan elde edilmiş olan buhara maruz bırakılan filamanlarda da görülmektedir. Şekil 2.12'de 16 saat boyunca 154°C'de farklı pH değerlerine maruz bırakılan bir örnekten elde edilen grafikte, 6 ile 7 pH değerlerinde maksimum dayanım sağlandığı ve asit tarafında daha keskin bir düşüş olduğu görülebilmektedir. Aynı şekilde nötral pH 7 değerinde sıcak su buharına maruz bırakılan filamanlarda da zaman geçtikçe dayanım kaybı meydana gelmektedir [7].



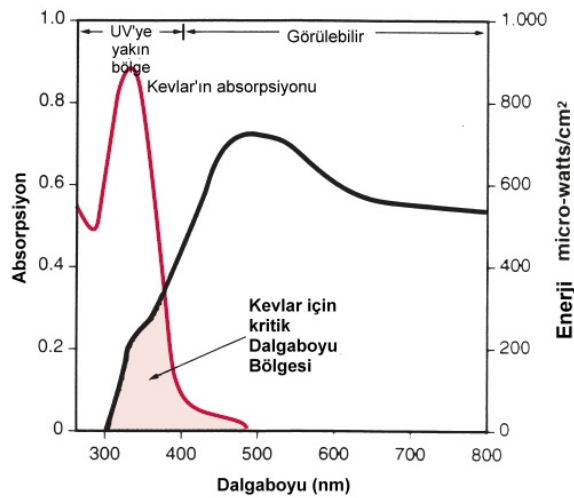
Şekil 2.12: Kevlar'ın hidrolitik stabilitesini gösteren grafik (154°C'de, farklı su buharı pH değerinde) [7].

Diğer polimerik malzemeler gibi, Kevlar da UV ışığına karşı duyarlıdır. Uzun süre UV ışığına maruz bırakılan korunmamış iplik, sarıdan kahverengiye doğru renk değişimi gösterme eğilimi sergiler. Dalga boyuna, süreye, şiddete ve ürün geometrisine bağlı olarak uzun vadeli UV ışığına maruz kalan ipliklerde aynı zamanda mekanik özelliklerde de kayıp meydana gelebilmektedir. Yeni ipliğin normal oda koşullarına maruz kalması sonucu renk kaybetmesi normaldir ve bozunmaya işaret etmez [7].

Bozunma sadece oksijenin varlığında meydana gelir ve nem veya atmosferik kontaminasyonlar (sülfür dioksit gibi) ile yoğunlaşmaz. Belirli bir dalga boyundaki ışığın fiber bozunmasına neden olabilmesi için iki koşulun sağlanması gerekmektedir [7]:

- Polimer tarafından absorpsiyonu;
- Kimyasal bağları koparmak için belirli düzeyde enerji.

Şekil 2.13’de güneş ışığı ile birlikte, Kevlar’ın absorpsiyon spektrumu görülmektedir. Burada görülen iki eğrinin kesiştiği bölge – özellikle 300 nm ile 450 nm arası – korumasız Kevlar’ın dış kullanımı düşünüldüğünde göz önünde bulundurulmalıdır. Bu aralık, UV yakını olarak adlandırılan ve görülen bölgeyi içermektedir. Kevlar’ın UV ışımından etkili olarak korunması için, bu aralıktaki ışık önlenmelidir [7].



Şekil 2.13: Solar spektrum ile Kevlar’ın absorpsiyon spektrumunun kesişme bölgesi [7].

Bunların yanı sıra burada sayılmış olan özellikler arasından önemli olanlarını tekrar etmek gerekirse aşağıdaki şekilde özetlenebilir [11]:

- Aramid fiberlerin kesilmesi ve sıkıştırılması zordur, bu nedenle örneğin kalıp içerisine yerleştirilmesi de güç olmaktadır. Bu işlemleri kolaylaştırmak için uygun kesme ve sıkıştırma ekipmanlarının olması gerekmektedir.

- Aramid fiberlerin baskı altında dayanımları cam ve karbona göre daha düşüktür. Bu nedenle bir çok üretici bu baskı dayanımını geliştirmek için hibrid malzemeler kullanmaktadır.

- Aramid fiberler çok kolay nem alabilmekte ve bu nedenle uygun şekilde reçine ile emdirilmeli ve neme maruz bırakılmamalıdır.

- Aramid fiberler diğer fiberlere göre daha düşük yapışma özelliği sergilediklerinden poliester, vinilester ve epoksi gibi kaliteli reçinelerle birlikte kullanılması tavsiye edilmektedir.

2.3. Cam Fiber Takviye Malzemesi

Sürekli cam fiberler farklı şekillerde kullanım bulmaktadır. Bunların arasında iplik demetleri, filamanlar (fiberler), iplik, kumaş, örülmüş kumaşlar vb. gibi ürünler yer almaktadır [11].

2.3.1. Cam fiber türleri ve şekilleri

Yapısal takviyeler için temel cam kompozisyonları E-cam, S-cam ve S-2 camdır. C tipi veya A tipi gibi diğer cam türleri, daha çok yapısal olmayan uygulamalarda kullanılmaktadır. Tanımlamada bulunan harf ilgili yapının kullanım yerine işaret etmektedir (örneğin E elektriksel, C kimyasal ve S yüksek dayanım gibi). E-cam, kireç-alumina-borsilikat temellidir ve geniş ölçüde plastik matrikslerde kullanılmaktadır. Çoğu örülmüş kumaşlar bu cam türünden üretilmektedir. Daha düşük alkali içeriğe sahiptir. Oldukça iyi çekme ile basma dayanımı ve rijitliğe sahiptir. Ancak darbe dayanımı oldukça zayıftır. Yine tipine bağlı olarak fiyatı £1-2/kg arasında değişmektedir. S-cam (R-veya T-cam; aynı fiber için farklı üreticilerin farklı isimlendirmeleri mevcuttur) bir silika-alumina-magnezyum

kompozisyonundan oluşmaktadır ve çekme dayanımını iyileştirmek için geliştirilmiştir. S-cam daha az ölçüde kumaş olarak kullanılmaktadır. Daha çok kritik askeri veya havacılık sanayii alanlarındaki kompozit uygulamalarında, yüksek mukavemeti (E-cama göre daha yüksek), uniform olması ve yapısal bütünlüğü açısından tercih edilmektedir. S-cam türü Birleşik Devletlerde OCF firması, R-cam Avrupa'da Vetrotex ve T-cam Japonya'da Nittobo firmaları tarafından üretilmektedir. R veya S tipine bağlı olarak fiyatı £12 ile 20/kg arasında değişmektedir. S-2 camı bir silika-alumina-magnezyum cam formülasyonuna sahip ve performans özellikleri de benzerlik göstermesine rağmen, bu karakteristikleri S-cam'a nazaran üçte bir oranında bir maliyet ile sunmaktadır. Bu maliyet farkından dolayı S-2 cam mühendislik yapılarında, S-cam'ın yerini alabilecek ciddi bir rakiptir. Yine S-2 cam ile hemen hemen eşdeğer olan R-cam tipi bir cam mevcuttur. E-cam'ın hemen hemen iki katı çekme dayanımı sergileyerek, bir miktar daha yüksek olan bir modüle sahiptir. Daha çok Avrupa'da askeri amaçlı kullanılmaktadır. C-cam türü (kimyasal) en iyi kimyasal direnci gösterir. Temel olarak lamine yapıların dış tabakasında yüzey kaplaması olarak kullanılarak kimyasal ve su borusu ile tanklarında tercih edilir [4,12].

Cam fiberlerin isimlendirilmesinde kullanılan standarda ait bir açıklama Tablo 2.4'de verilmiştir [4].

Tablo 2.4: Cam fiberlerin isimlendirilmesine ait örnek [4].

| Cam Tipi | İplik Tipi | Filaman Çapı (μm) | İplik ağırlığı (tex) | Tek iplik bükümü | Çoklu iplik bükülmesi |
|--|------------|--------------------------------|----------------------|------------------|-----------------------|
| E | C | 9 | 34 | Z | S |
| E: Elektriksel; C: Sürekli; Z: saat yönünde; S: saate ters yönde | | | | | |

Tablo 2.5 ise cam fiberlerin isimlendirilmesinde en yaygın kullanılan harfleri açıklamaları ile birlikte özetlemektedir [3].

Tablo 2.5: Cam fiberlerin isimlendirilmesinde kullanılan harflerin açıklamaları [3].

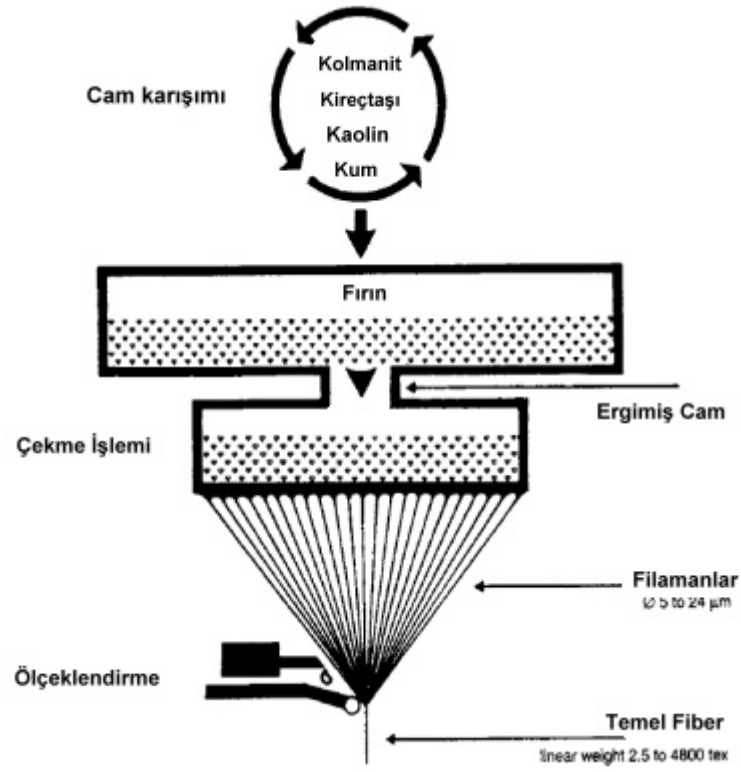
| Tanımlayıcı Harf | Karakteristik Özellik |
|------------------|------------------------------|
| E, elektriksel | Düşük elektriksel iletkenlik |
| S, mukavemet | Yüksek mukavemet |
| C, kimyasal | Yüksek kimyasal direnç |
| M, modül | Yüksek rijitlik |
| A, alkali | Yüksek alkali camı |
| D, dielektrik | Düşük dielektrik sabit |

Ticari olarak piyasada temin edilebilen cam fiber şekilleri arasında iplikler (filamanlar iplik oluşturmak üzere bükülerek üretilmektedir/strand), ince ipliklerin tekrar bükülmesi ile oluşturulan daha geniş çaptaki iplikler (bunlar genellikle tex olarak adlandırılan ağırlık birimlerine göre değişkenlik gösterirler; tex: 1000 lineer metrenin g olarak ağırlığı; genel olarak tex aralığı 5 ile 400 arasında değişmektedir/yarn) ve zayıf olarak birbirleriyle bükülmeden oluşturulan filaman veya iplikler olarak (tex aralığı 300 ile 4800 arasında değişir/roving) ayrılabilir [4].

2.3.2. Üretim metodu

Fiber üretimi, çeşitli türlerin üretimi için (elektriksel, kimyasal, yüksek mukavemetli vb. gibi) ergiyik çekme (melt drawing) ile üretilip, sonraki adımlarda boyutu indirgenerek, bükülerek veya kumaş halinde örülerek proseslemek üzere filamanlardan oluşan ipliklere çekilirler (Şekil 2.14). Hammaddeler (kum, kaolin, kireçtaşı ve kolmanit) karıştırılarak fırına beslenmesi ile 1600°C'ye kadar ısıtılmaktadır. Sıvı cam kanallara akar ve fiberler elektriksel olarak ısıtılan kovanlardan çekilir. Her biri 10 ile 24 µm çapında binlerce filaman üretebilmektedir. Filamanlar bir astar yapıştırıcı ile kaplanarak yapışma garanti edilir ve aşınmaya karşı koruma sağlanır (aynı zamanda diğer proses adımlarında ihtiyaç duyulan temel özellikler sağlanır. Nihai olarak ıslak fiber kuruyarak son şekline getirilir [13].

Takviye malzemesinin etkili şekilde görevini yerine getirebilmesi için plastik ile güçlü bir bağ oluşturması gerekir. Belirli takviye malzemeleri için, bu bağ yapısını güçlendirmek üzere özel temizleme, Kaplama, katkı ilaveleri, bitirme işlemleri vb. uygulamalar kullanılır. Çoğu zaman, belirli bir özelliği yerine getirmek üzere (örneğin elektriksel iletkenlik için nikel vb. ile kaplanması) yüzeysel olarak modifiye edilirler. Farklı tip takviye yapıları kullanılarak farklı takviye özellikleri ve/veya takviyelendirmeyi basitleştirirerek arzu edilen dizayn performans şekillerine ulaşılır. Buna örülmüş, örülmemiş, iplik, preform ve diğer şekiller örnek olarak verilebilmektedir. Bu farklı yapılar, farklı prosesleme ve yönsel özellikler elde etmek için kullanılır [13].



Şekil 2.14: Genel olarak sürekli cam fiber üretimine ait görsel açıklama [13].

2.3.3. Karakteristik malzeme özellikleri

Cam fiberlerin özellikleri kimyasal kompozisyon ve üretim şekli ile farklılık göstermektedir, fakat burada açıklanmış olan özellikleri onları kompozit malzemelerde takviye malzemesi olarak ideal kılmaktadır [12]:

1. Yüksek çekme mukavemeti. Cam fiberler yüksek bir çekme dayanımı-ağırlık oranına sahiptir.
2. Yüksek ısıl direnç. Cam fiberler, sıcaklığın oda sıcaklığından 200°C'ye artması ile birlikte mukavemette artış göstermektedirler. 200°C'nin ötesinde mukavemet ve esneklik düşer. Buna bağlı olarak 370°C'de mukavemetin %50'si ve 540°C'de %25'i kendini korur.
3. Ateşe dayanım. Cam inorganiktir ve bu nedenle cam fiberden üretilen kumaşlar tutuşturulamaz.
4. İyi termal iletkenlik. Yüksek termal iletkenlik ile düşük lineer genleşme sergilerler.

5. İyi nem direnci. Cam fiberler nem almazlar ve su ile temasta genleşme, şişme vb. olmaz.
6. İyi korozyon ve kimyasal direnç. Cam fiberler birçok kimyasal çözeltiliye karşı direnç gösterir. Hemen hemen tüm organik çözeltiler ile çoğu asit ve alkalilere karşı direnç gösterirler.
7. Oldukça yüksek stabilite. Cam fiberler atmosferik koşullara mükemmel dayanım sergiler. Aynı zamanda güneş ışığından veya biyo bozunumlardan etkilenmezler.
8. Mükemmel elektriksel özellikler. E-cam fiberler yüksek derecede dielektrik mukavemet ve düşük dielektrik sabite sahiptirler.
9. Düşük yer faktörü. Cam fiberler 2.54 gibi spesifik bir ağırlığa sahiptir ve bu nedenle çok az yer kaplarlar.
10. Ekonomik. Diğer yüksek performans fiber malzemeleri ile karşılaştırıldığında, cam fiberler düşük bir maliyete sahiptir.

Tablo 2.6’da E-ve S-cam türleri için kimyasal bileşimleri sunulmuştur. Bunlara ilave olarak Tablo 2.7’de ise E-cam’a ait fiziksel, mekanik ve ısıl özellikleri özetlenmektedir [12,14].

Tablo 2.6: E-ve S-cam malzemelerinin kimyasal bileşimleri [12].

| Bileşik | E-Cam (%) | S-Cam (%) |
|--------------------------------------|------------------|------------------|
| SiO ₂ | 52-56 | 65 |
| Al ₂ O ₃ | 12-16 | 25 |
| CaO | 16-25 | - |
| MgO | 0-5 | 10 |
| B ₂ O ₃ | 5-10 | - |
| N ₂ O ve K ₂ O | 0-2 | - |
| TiO ₂ | 0-1.5 | - |
| Fe ₂ O ₃ | 0.08 | - |
| F ₂ | 0-1.0 | - |

Tablo 2.7: Fiber E-cam özelliklerin özetlenmesi [14].

| Özellik | Birim | Değer |
|--------------------------------|-------------------|----------------------|
| Yoğunluk | g/cm ³ | 2.60 |
| Sertlik (50 g – 15 sn Vickers) | - | 5.60 |
| Çekme Mukavemeti | MPa | 2400 |
| Çekme Modülü | GPa | 73 |
| Kopma noktasında uzama | % | 2.2-2.5 |
| Yumuşama noktası | °C | 840 |
| Lineer genişleme katsayısı | m/m/°C | 5.3x10 ⁻⁶ |
| Isıl iletim katsayısı | W/m K | 1.0 |

Yukarıdakilerden yola çıkarak E-cam fiberlere ait özellikler şu şekilde özetlenebilmektedir: Düşük maliyet, yüksek üretim oranları, yüksek mukavemet, yüksek rijitlik, oldukça düşük yoğunluk, alev almama, ısıya dayanım, iyi kimyasal direnç, nem almama ve elektriksel yalıtım [15].

Tablo 2.8’de yaygın olarak kullanım bulan E-ve S-cam fiberlerine ait farklı fiber malzemeleri ile karşılaştırmalı özellikleri verilmektedir [15].

Tablo 2.8: Yaygın ticari uygulamaları olan fiberlerin karşılaştırılması [15].

| Malzeme | Yoğunluk (g/cm ³) | Çekme Mukavemeti (MPa) | Young Modülü (GPa) |
|-----------|-------------------------------|------------------------|--------------------|
| E-Cam | 2.55 | 2000 | 80 |
| S-Cam | 2.49 | 4750 | 89 |
| Alumina | 3.28 | 1950 | 297 |
| Karbon | 2.00 | 2900 | 525 |
| Kevlar 29 | 1.44 | 2860 | 64 |
| Kevlar 49 | 1.44 | 3750 | 136 |

2.4. Kumaş Tipleri ve Yapıları

Bir polimer esaslı kompozitte, uzun fiber şeklindeki karbon, aramid, veya bunların kombinasyonları ile, bir veya daha fazla yassı fiber katmanı oluşturarak, üretilen yapılar kumaş olarak tanımlanır. Bu katmanların bir arada tutulması, ya fiberlerin oluşturdukları mekanik bir kilitleme veya ikinci bir malzemenin kullanımı ile sağlanır [16].

Kumaş tipleri kullanılan fiberlerin oryantasyonuna ve fiberleri bir arada tutmak için kullanılan çeşitli yapılandırma metotlarına bağlı olarak sınıflandırılır. Dört temel fiber oryantasyon sınıfı şu şekilde sıralanabilir: Tek yönlü, 0/90°, çok eksenli ve diğer/rastgele [16].

2.4.1. Tek yönlü kumaşlar

Tek yönlü bir kumaşta, fiberlerin büyük bir kısmı tek yönde yer alır. Diğer küçük bir miktar fiber veya farklı bir malzeme ise, birincil fiberleri doğru pozisyonda tutabilmek için, ana yapı ile farklı yönlerde yer alabilmektedir. Bu ikincil fiberler de aynı zamanda bazı yapısal özellikler ile kumaşa katkıda bulunabilirler. Tek yönlü kumaşlarda birincil fiberler 0° pozisyonunda bulunabildikleri gibi 90° pozisyonunda da bulunabilmektedirler [16].

Tek yönlü kumaşlar, fiberlerin komponent içerisinde tam gerektiği yere ve optimum miktarda yerleştirilmesine olanak vermektedir. Mekanik özellikler açısından tek yönlü kumaşlar, ikincil bir malzemenin tek yönlü fiberleri tutmadığı, tek yönlü ön-emdirilmiş bant şekliyle geliştirilebilmektedir. Bu ön-emdirilmiş yapılarda sadece reçine sistemi fiberleri yerinde tutmaktadır [16].

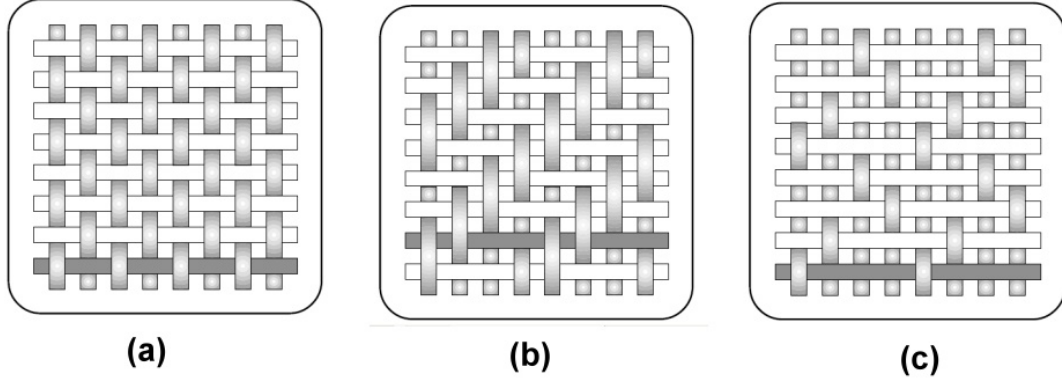
Birincil fiberleri bir tek yönlü yapı olarak üretmenin pek çok farklı yöntemi mevcut olup, bunların arasında dokuma, dikişle birleştirme ve yapıştırma yer almaktadır. Diğer kumaşlarda olduğu gibi, tek yönlü bir kumaşın yüzey kalitesi, iki temel faktör tarafından belirlenmektedir: Birincil fiberin tex ve iplik sayısı kombinasyonu ve ikincil fiberlerin miktarı ile çeşidi. Kumaşın yüzey pürüzsüzlüğü ve stabilitesi öncelikli olarak yapısal stil tarafından belirlenirken, alansal ağırlık, gözeneklilik ve nem uygun fiber tex ve cm başına fiber sayısının kombinasyonu ile belirlenmektedir [16].

2.4.2. 0/90° kumaşlar

Birden fazla fiber oryantasyonuna ihtiyaç duyulduğu uygulamalarda, 0° ile 90° fiber oryantasyonuna sahip kumaş kombinasyonu kullanılmaktadır. Bu örülü ürünlerin büyük bir kısmı örme işleminden ziyade birbirine dikilmesi ile oluşturulmaktadır ve burada kullanılan dikme yöntemi çok eksenli kumaşlar başlığı altında açıklanmıştır [16].

Örülmüş kumaşlar, eğilmiş fiberlerin (0°) çapraz fiberler (90°) ile birbirine düzenli bir örneğe veya örgü stiline bağlı olarak geçirilmesi ile oluşturulmaktadır. Kumaşın bütünlüğü ise fiberlerin mekanik olarak birbirine kilitlenmesi ile sağlanmaktadır. Tek

yönlü kumaşlarda olduğu gibi, burada da kumaşın stabilitesi ve yüzey düzgünlüğü birincil olarak örgü tipi tarafından kontrol edilmektedir. Alansal ağırlık, gözeneklilik ve ıslanabilirlik uygun fiber tex ve cm başına fiber kombinasyonu ile belirlenmektedir [16].



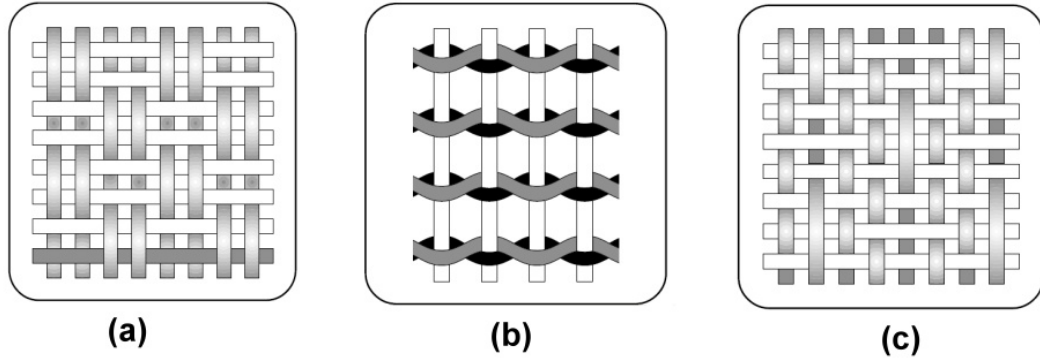
Şekil 2.15: 0/90° örgü tipleri [16].

Sade örgüde (plain) her bir eğilmiş fiber değişimli olarak, her bir çapraz fiberin altından ve üzerinden geçmektedir (Şekil 2.15.a). Kumaş simetrik, iyi bir stabiliteye sahip ve kabul edilebilir ölçüde gözeneklidir. Bununla birlikte diğer kumaş tipleri ile karşılaştırıldığında en düşük mekanik özellikleri sergilemektedir. Geniş fiberler (yüksek tex) ile bu örgü tipi fazlasıyla dalga oluşturmaktadır ve bu nedenle çok ağır olan kumaşlar için kullanımı tercih edilmez [16].

Bir veya daha fazla eğilmiş fiber değişimli olarak, iki veya daha fazla çapraz fiber altından ve üstünden sürekli tekrar eden bir şekilde geçmektedir (kabarık dokunmuş kumaş/twill) (Şekil 2.15.b). Bu kumaşa karşılık düz veya kırık bir çapraz ‘nervür’ şeklinde görsel bir etki oluşturmaktadır. Sade örgü ile karşılaştırıldığında, stabilitede küçük bir düşüşe karşılık üstün ıslanabilirlik özelliği göstermektedir. Daha düşük dalga oranı ile de aynı zamanda daha düzgün bir yüzey ve oldukça daha yüksek mekanik özellikler sergilemektedir [16].

Bir diğer örgü türünde (satin) temelde kabarık dokunmuş olan kumaşın daha az eğilmiş ve çapraz kesişimler sağlamak üzere değiştirilmiş bir biçimidir (Şekil 2.15.c). İsimlendirmede kullanılan ‘sertlik’ numarasını (tipik olarak 4, 5 ve 8), fiber örneği tekrar etmeden kesişen ve altından geçen fiberlerin toplam sayısı oluşturmaktadır.

Saten örgüler oldukça düzdür ve iyi bir ıslanma kabiliyetleri vardır. Düşük dalga yapısı iyi mekanik özellikler kazandırmaktadır. Saten örgüler, fiberlerin en yakın biçimde örülmesine izin vererek sıkı örgü yapıların oluşumunu sağlamaktadır. Bununla birlikte stilin düşük stabilitesi ile asimetrik yapı göz önünde bulundurulmalıdır. Asimetrik yapı sonucu, kumaşın bir yüzeyinde ağırlıklı olarak eğilmiş yön görülürken diğer tarafında ise ağırlıklı olarak çapraz yön görülecektir. Fazla sayıda katmanın bir araya getirilmesinde kumaşlarda asimetrik etki sonucu yer alan bu gerilimin de oluşturulan komponentlere aktarılmamasına dikkat edilmelidir [16].



Şekil 2.16: 0/90° örgü tiplerinin devamı [16].

Sepet örgü tipi (basket) temel olarak sade örgü aynısıdır, tek fark burada iki veya daha fazla eğilmiş fiberin değişmeli olarak iki veya daha fazla çapraz fiber birbirine geçmesidir (Şekil 2.16.a). İki eğilmiş iki çapraz ile kesişmesi sonucu 2x2 sepet tanımlanmaktadır, fakat fiberlerin bu düzeni simetrik olmak zorundadır. Bu nedenle 8x2, 5x4 vb. gibi yapıların oluşturulması mümkündür. Sepet örgüsü, sade örgü ile karşılaştırıldığında daha yassı, daha az dalgalı ve daha güçlüdür, fakat aynı zamanda daha az stabildir. Ağır kumaşların yapımında, fazla dalga oluşumundan kaçınmak için, kalın (yüksek texli) fiberler ile kullanılmalıdır [16].

Düşük fiber sayısına sahip olan leno örgü tipi ‘açık’ kumaşların stabilitesini geliştirmektedir (Şekil 2.16.b). Leno örgü tipi, bitişik eğilmiş fiberlerin yine ardışık çapraz fiberlerin etrafında, her bir çapraz fiberi yerine kilitleyen, bir spiral çift oluşturmak üzere döndürüldüğü bir çeşit sade örgüdür. Leno örgülü kumaşlar normalde diğer örgü stilleri ile birlikte kullanılır, çünkü tek başına kullanıldıklarında aralıklı yapısı nedeniyle etkili bir kompozit oluşturamazlar [16].

Mock leno örgü tipinde ise, eğilmiş fiberlerin ara sıra düzenli aralıklarla, fakat genellikle birkaç fiber uzakta, değişimli olan üst-alt geçişinden sapan ve bunun yerine her iki veya daha fazla fiberde birbirine geçtiği, bir çeşit sade örgü tipidir (Şekil 2.16.c). Bu durum benzer aralıklarla çapraz yönde de meydana gelerek, kalınlığı artmış, daha pürüzlü bir yüzey ve ilave gözenek yapısına sahip bir kumaş ile sonuçlanmaktadır [16].

Tablo 2.9’da yukarıda sıralanmış olan 0/90° yapılı örgü tiplerinin karşılaştırılması olarak özellikleri verilmiştir [16].

Tablo 2.9: Örgü tiplerine ait özelliklerin karşılaştırılması [16].

| Özellik | Sade (plain) | Twill | Saten | Sepet | Leno | Mock Leno |
|--------------------|------------------|------------------|-----------|------------------|----------------|------------------|
| İyi Stabilitite | iyi | kabul edilebilir | zayıf | zayıf | mükemmel | kabul edilebilir |
| Düşük Gözeneklilik | kabul edilebilir | iyi | mükemmel | zayıf | çok zayıf | kabul edilebilir |
| Yüzey Pürüzsüzlüğü | zayıf | kabul edilebilir | mükemmel | zayıf | çok zayıf | zayıf |
| Denge | iyi | iyi | zayıf | iyi | zayıf | iyi |
| Simetrik | mükemmel | kabul edilebilir | çok zayıf | kabul edilebilir | çok zayıf | iyi |
| Düşük Dala Oluşumu | zayıf | kabul edilebilir | mükemmel | zayıf | zayıf/mükemmel | zayıf |

0/90° kumaşlar aynı zamanda, iki tek yönlü katmanı tek bir kumaşa kombine eden, dikme prosesi ile de üretilebilmektedir. Bu tür kumaşlar ile, örülmüş olanlara karşılık, bazı mekanik özelliklerin performansında 20%’ye kadar artış elde edilebilmektedir. Bu artış aşağıdaki faktörlere bağlı olmaktadır [16]:

1. Paralel dalgasız fiberler, yükleme gerçekleştiğinde hemen gerilim doğurmaktadır.
2. Örülmüş kumaşların yapısında yer alan eğilmiş ve çapraz fiberlerin kesişim noktasında bulunan gerilim noktaları ortadan kaldırılmış olmaktadır.
3. Örülmüş yapı ile karşılaştırıldığında daha yoğun olarak fiber lamine yapı içersine yerleştirilebilmektedir. Bu durumda kumaş daha çok tek yönlü katmanlar şeklinde davranmaktadır.

Hibrid olarak adlandırılan kumaşların yapısında ise birden fazla yapısal fiber bulunmaktadır. Düşük ağırlık veya çok ince lamine yapılara ihtiyaç duyulduğunda, bir hibrid kumaş iki yerine tek bir katman içerisinde iki fiberin bulunmasına izin verecektir. Örülmüş bir hibrid kumaşın içerisinde bir fiberin eğilmiş olarak diğerin ise çapraz olarak yer alması sağlanmış olacaktır, fakat her bir fiberin her bir eğilmiş/çapraz yönde bulunması daha yaygın olarak tercih edilmektedir. Aynı zamanda hibridler en çok 0/90° olarak örülmüş kumaşların içerisinde bulunmakla birlikte, aynı prensip 0/90° dikilmiş, tek yönlü ve çok eksenli kumaşlarda da kullanılmaktadır. En çok kullanılan hibrid kombinasyonları karbon/aramid, aramid/cam ve karbon/cam'dır [16].

2.4.3. Çok eksenli kumaşlar

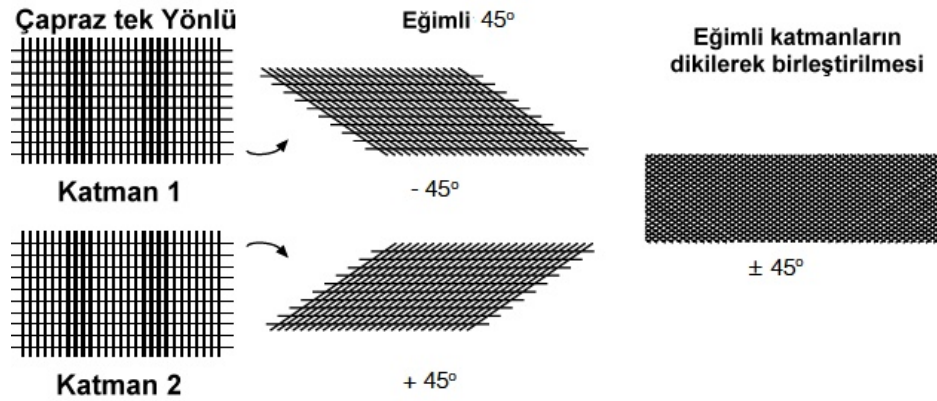
Son yıllarda çok eksenli kumaşlar kompozit komponentlerin yapısında yaygın kullanım bulmaya başlamıştır. Bu kumaşlar, uzun fiberlerden oluşan bir veya daha fazla katmanın ikincil, fakat yapısal olmayan, iplik dikişi ile yerinde tutulan şekillerden oluşmaktadır. Ana fiberler herhangi bir yapısal fiber ile herhangi bir kombinasyonda bulunabilmektedir. Dikiş amalı kullanılan iplik için, düşük masraf ve uygun fiber özellikleri ile kombinasyonları sonucu genellikle polyester tercih edilmektedir. Dikiş işlemi, basit olan 0/90° örgülü kumaşların ötesinde, çok sayıda fiber oryantasyon seçeneğine, tek bir kumaş içerisinde kombine edilmesine izin vermektedir. Çok eksenli kumaşlar aşağıda sıralanmış avantajları da beraberinde getirmektedirler [16]:

1. Çok eksenli kumaşlar ile daha iyi mekanik özellikler sağlanmaktadır. Öncelikli olarak fiberlerin her zaman düz ve dalgalı olmamasından ve kumaş içi artırılmış olan katmanların sayısından yola çıkarak daha fazla fiber oryantasyonları mümkün olduğundan, mekanik özelliklerdeki bu gelişme gerçekleşebilmektedir.
2. Kumaşların daha kalın olarak üretilebildikleri ve lamine yapıların içerisine daha az katman ihtiyacı olacak şekilde, çok sayıda farklı fiber oryantasyonu mümkün olduğu gerçeğine dayanarak komponent oluşturma hızı geliştirilmiştir.

Tüm bunların yanı sıra, polyester fiber bazı reçine sistemleri ile çok iyi bağ oluşturamadığından ve dikiş gevşeme veya diğer hata modları için bir başlangıç noktası oluşturabilmektedir. Aynı zamanda kumaş üretim prosesi oldukça yavaş ve makine-ekipman masrafları da yüksek olabilmektedir. Bunlarla birlikte, düşük ağırlıklı kumaşlar için daha iyi bir bitiş yüzeyi sağlamak için, daha pahalı ve düşük tex'li fiberlere ihtiyaç duyulduğu gerçeği ile, yüksek kaliteli, dikilmiş kumaşların üretim masrafları, örülmüş olanlara kıyasla oldukça yüksek olabilmektedir [16].

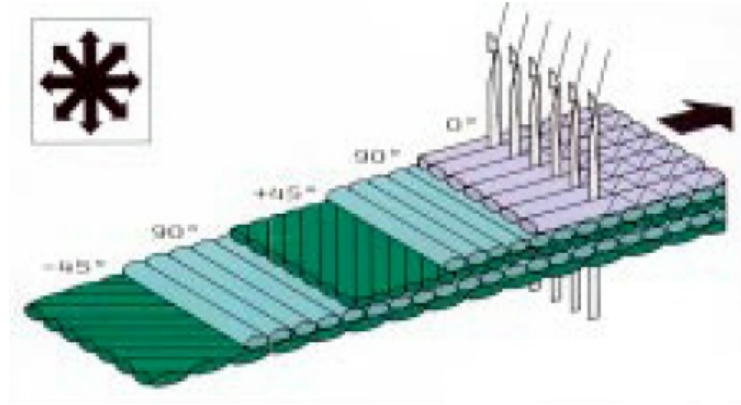
Bu çok eksenli kumaşları üretmenin iki temel yolu mevcuttur [16]:

'Örgü & Dikiş' yöntemi ile $+45^\circ$ ile -45° eğimli olan katmanlar, çapraz tek yönlü kumaşları örüp ve bunları özel bir makinede 45° 'ye eğerek oluşturulmaktadır. Tek yönlü bir eğilmiş veya tek yönlü bir çapraz kumaş da eğmeden 0° ve 90° oluşturulmakta ve bunlar basit bir çerçeve dikişi ile birbirine dikilmektedir (Şekil 2.17) [16].



Şekil 2.17: 'Örgü & Dikiş' yöntemi ile çok eksenli kumaş üretimi [16].

Eşzamanlı dikiş üretimi, özel bir makine yardımıyla, özel bir birleştirme prosesi kullanarak oluşturulmaktadır. Bu tip makinelerin, her bir katman oluşturulup birbirine dikilene kadar eş zamanlı olarak her bir eksen/katman için fiberleri çektiği bir çerçevesi vardır (Şekil 2.18) [16].



Şekil 2.18: 'Eşzamanlı dikiş' yöntemi ile çok eksenli kumaş üretimi [16].

2.5. Nano Kristalin Elmas Toz Takviye Malzemesi

2.5.1. Üretim metodu

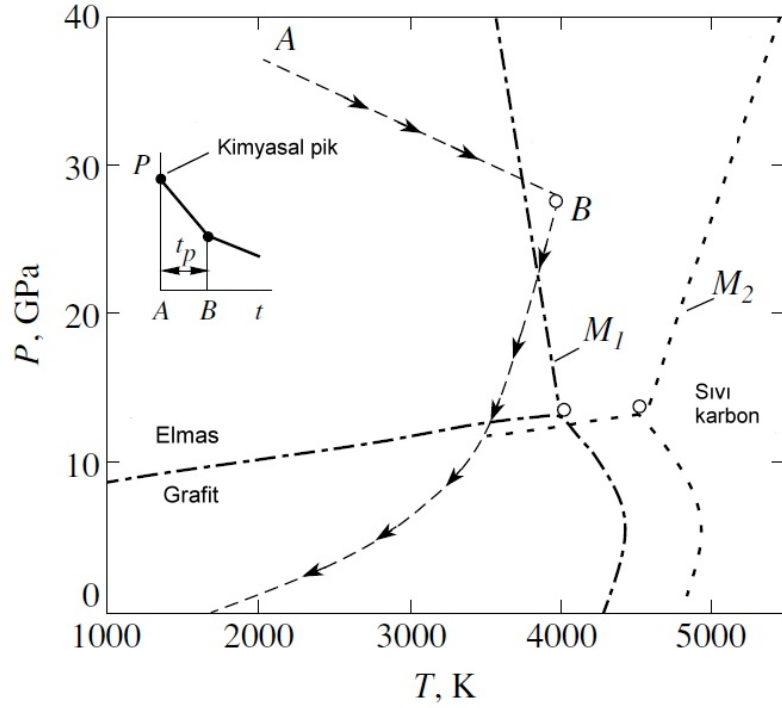
Nano boyutlu kristalin elmasın patlatma yöntemi ile sentezi, 1980'li yılların ortalarında başlayan araştırmalarla önem kazanmıştır. Sentezleme prosesinin ilk adımı genellikle TNT/RDX (trinitrotoluen/hekzojen) gibi kısıtlı oksijen içeren bir şarjın koruyucu bir hazne içinde patlatılmasıdır [17].

Patlama ile açığa çıkan serbest karbon atomları, reaksiyonun meydana getirdiği yüksek sıcaklık ve yüksek basınç ortamında koagüle olup yeniden düzenlenerek nano boyutlu elmas kristallerini oluşturur. Soğutma sonrası elde edilen kurum, aşırı dağılmış elmasın (UDD-Ultradispersed Diamond) yanı sıra amorf karbon ve grafit de içerir [17].

Prosesin son aşaması, elmasın diğer karbonlu ürünlerden ayrıştırılması ve safsızlıkların giderilmesidir [17].

Patlatma parametrelerinin optimizasyonu ile elmas verimi artırılabilir. Bu yöntemle elde edilen elmas tozunun tane boyutu 1-15 nm aralığındadır ve karakterizasyonu ile ilgili birçok çalışma yapılmaktadır [17].

Şekil 2.19'da karbon malzemesine ait faz diyagramı ile nano boyutta elmas toz üretimi için gerekli, patlama koşul ve parametreleri görülebilmektedir [18].



Şekil 2.19: Karbon ile elmasa ait faz diyagramı ve patlama parametreleri [18].

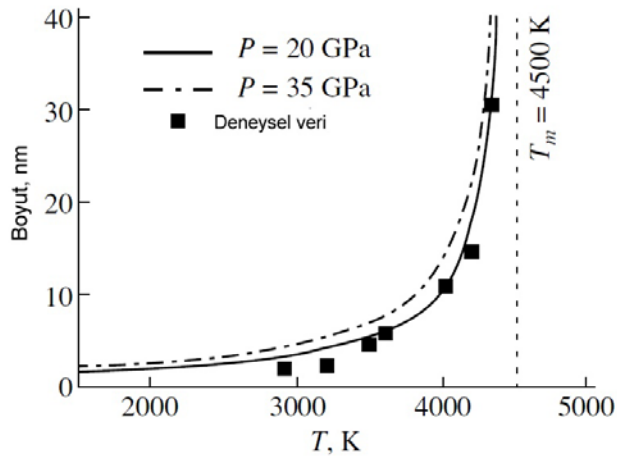
Şekil 2.19 içerisinde yer alan küçük grafikte bir patlama dalgasındaki basınç profilini göstermektedir. Buna göre A noktası patlamaya ait şok basıncını gösterirken (kimyasal pik), AB arası patlayıcı moleküllerinin ayrışması ile birlikte patlama ürünlerinin oluşumunu ve 20 GPa'dan daha yüksek bir basınçta serbest karbonun (negatif oksijen dengesi bulunan patlayıcılar için) aşırı dağılmış elmasa yoğunlaşması gerçekleşmektedir. B ise ayrışmayı göstermektedir ve t_p ayrışma süresine karşılık gelmektedir. Diyagramda görülen M_1 ve M_2 çizgileri karbon için olası ergime hatlarını göstermektedir [18].

Dünya çapında yapılan araştırmalarda patlamanın hangi bölümünde (önderlik eden şok dalgasında mı yoksa kimyasal reaksiyon bölgesinde mi) nano boyutta elmas tozun şekillendiği konusunda fikir birliğine varılamamıştır [18].

Moleküler hesaplar dalga-ön enerjisinin patlayıcı molekülün bantları üzerine birkaç elektron voltluk enerjiyi 10^{-10} sn'de odaklayabildiğini ve bu enerjinin moleküler bağları kırmak için yeterli olduğunu göstermiştir. Bu ayrılma sadece bölgesel "sıcak noktalarda (hot spot)" meydana gelmektedir [18].

Patlayıcı molekül ayrılmadan kaynaklı enerjiyi önce absorbe eder ve sonrasında serbest karbonun da içerisinde bulunduğu (daha sonrasında nano boyutta elmas buradan şekillenecektir) atomlara, serbest radikallere ve molekül parçacıklara parçalanır [18].

Sıcak noktalarda, patlayıcıya ait ayrıışan komponentler tekrar birleşerek kimyasal enerji açığa çıkarırlar. Bu enerji çıkışı sıcaklığın artmasına ve patlayıcının ayrıışp reaksiyonuna neden olmaktadır. Bunun bir sonucu olarak kimyasal enerji, şok dalgasını sürekli olarak devam ettirir. Bir oksijen eksikliği meydana geldiğinden patlayıcı içerisinde bulunan karbonun bir kısmı kalır ve patlama reaksiyonu sonrasında serbest karbon haline dönüşür. Serbest karbon reaksiyon bölgesinde birbiriyle çarpıştığında, sıvı durum karbonu daha büyük bir damla haline koagüle olur ve katı durum karbonu ise çarpışma sonrası yine ayrılacaktır. Geleneksel bir karbon faz diyagramında patlamaya ait sıcaklık ve basınç katı bölgede bulunmalıdır. Karbon partiküllerinin ergime noktasının partikül boyutu ile ilgili olduğu anlaşılmıştır. Örneğin nano ölçekli bir metal parçacığın ergime noktası bir metal bloğundan daha düşüktür. Taylor formülasyonu ile yapılan çalışmalar sonucunda basıncın ergime noktası üzerine zayıf bir etkiye sahip olduğu ancak partikül boyutunun çok daha büyük bir etkisi olduğu anlaşılmıştır (Şekil 2.20) [19].



Şekil 2.20: Ergime noktası ile aşırı dağılmış elmas partikül boyutu arasındaki ilişki [19].

Boyut 10 nm altına düştüğünde ergime noktası ani olarak düşmektedir. Bu durum ise şu şekilde açıklanabilmektedir: serbest karbon çarpıştığında damlayı büyütme için koagüle olduğunda, ergime noktası patlama sıcaklığına ulaşana kadar yükselir [19].

Araştırmalardan bilinmektedir ki patlayıcının patlama sıcaklığı sıvı faz bölgesinde bulunmaktadır. Bu da patlayıcıdan kaynaklı serbest karbonun daha büyük damlalara koagüle olabileceğini göstermektedir [19].

Reaksiyon bölgesinde patlayıcı sürekli olarak ayrışmaktadır ve sonuç olarak serbest karbon oluşmaktadır. Büyüme ile birlikte karbon damlası bir katı olmak üzere kristalize olmaya başlar [19].

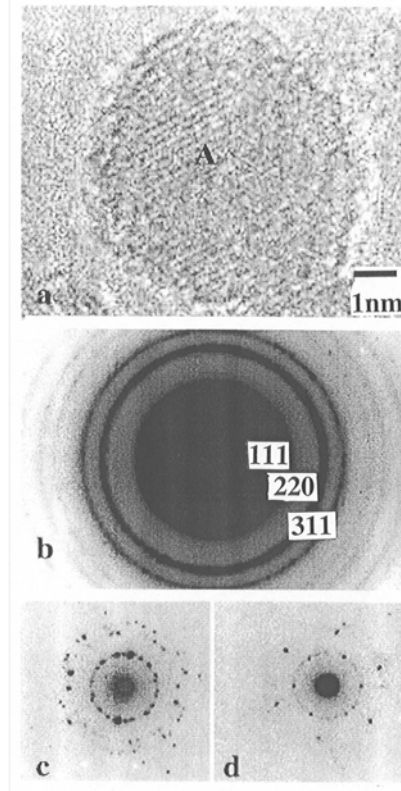
Sonraki aşamada patlayıcının ayrışması tamamlanmıştır. Ancak bir kimyasal reaksiyon gerçekleşmekte fakat etkili olan ısı önderlik eden şok dalgasını destekleyemeyecek noktaya gelmektedir. Bu dalga sıcaklığın ve basıncın aniden düşmesine neden olmaktadır. Bu termodinamik durumda kristalizasyon prosesi başlar. Sıcaklığın düşmesi ile birlikte elmasın grafitleşme prosesi duracaktır ve elmas metastabil durumda kalacaktır; bu elde edilmek istenen aşırı dağılmış elmas durumudur [19].

Faz geçiş ısı ve hacim etkisi oldukça düşüktür proses iki adıma ayrılabilir. Birincisinde, mekanik ve kimyasal reaksiyon söz konusudur ve sıcaklık, basınç, spesifik hacim ve serbest karbon miktarının zamanla değişimi için çeşitli kurallar kullanılabilir. İkinci adımda ise birinci adımda elde edilen koşullar doğrultusunda kristal dinamikleri söz konusu olur [19].

2.5.2. Malzeme yapısı

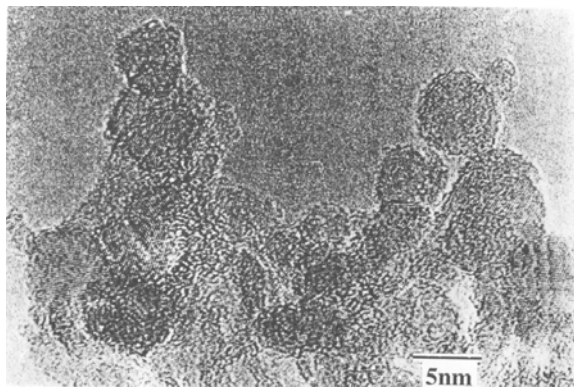
Aşırı dağılmış elmas, okside olmamış karbondan negatif bir oksijen dengesine sahip patlayıcıda, patlama olayı süresince yüksek basınç ve yüksek sıcaklıkta şekillenmektedir. Bu yöntemle üretilen nano boyutta elmas tozun, doğal elmas ve eş zamanlı olarak bazı nano metrik partikül özelliklerini gösterdiği belirlenmiştir. Bu mükemmel kombinasyon ultra ince elması geleneksel yöntemlerle insanoğlu tarafından yapılmış elmas ve doğal elmastan ayırmaktadır. Sahip olduğu potansiyel malzeme biliminde, malzeme yüzey özelliklerin geliştirilmesinde ve hatta tıp dalında fark edilmiştir. Rusya, Japonya ve Amerika Birleşik Devletler başta olmak üzere dünyaca araştırılan bir konu haline gelmiştir [19].

Şekil 2.21’de STEM ve HRTEM ile aşırı dağılmış elmasa ait örnek görüntüler görülebilmektedir [20].



Şekil 2.21: a) 7 nm çapında elmas nano küre görüntüsü, b) birçok, c) birkaç partikül ve d) dört nano elmasa ait nano difraksiyon paternleri [20].

Şekil 2.22’de ise yine HRTEM ile elde edilmiş olan elmas tozuna ait bir görüntü görülmektedir [21].



Şekil 2.22: Çapı 2 ile 8 nm arasında değişen ve çoğunlukla küresel şekiller gösteren HRTEM nano elmas toz görüntüsü [21].

3. MATRİKS MALZEMELERİ

3.1. Reçine Sistemlerine Giriş

Kompozit malzemelerde kullanılacak olan herhangi bir reçine sisteminden aşağıdaki özellikler beklenmektedir [16]:

- a. İyi mekanik özellikler
- b. İyi yapışma özellikleri
- c. İyi dayanım özellikleri
- d. Çevresel etkenlere karşı direnç.

Fiber takviyeli kompozitlerde kullanılan reçineler, bazen ‘polimerler’ olarak adlandırılmaktadır. Tüm polimerler, birbirini tekrar eden basit birimlerin uzun zincir moleküllerinden oluşma özelliğine sahip olan bu yaygın karakteristiği sergiler. İnsan yapımı olan polimerler genel olarak ‘sentetik reçine’ veya basit olarak ‘reçine’ olarak adlandırılır. Polimerler, ısının özelliklerine etkisi bakımından, temel olarak ‘termoplastik’ ve ‘termoset’ olarak iki gruba sınıflandırılabilir [16].

Termoplastikler metaller gibi ısıyla birlikte yumuşar ve sonunda eriyip soğutma ile birlikte yeniden katılaşır. Sıcaklık skalasında ki bu yumuşama veya ergime noktasının geçilmesi prosesi istenildiği kadar, malzemenin her iki durumundaki özelliklerini fark edilebilir ölçüde etkilemeden, tekrarlanabilir. Tipik termoplastiklere naylon ve Polipropilen örnek olarak sayılabilir ve bunlar da örnek olarak kısa cam fiberleri ile takviyelendirilerek kullanılabilir [16].

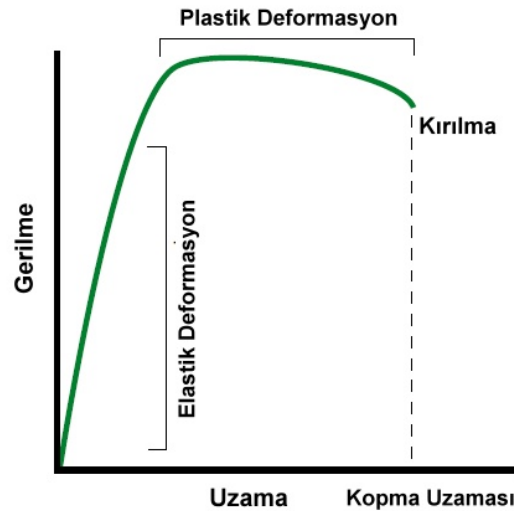
Termoset malzemeler, reçine ile sertleştiricinin veya reçine ile bir katalizörün karıştırıldığı ve ardından tersinir olmayan bir kimyasal reaksiyon sonucu sert ve ergimez bir ürün haline getiren, kimyasal reaksiyonlar yardımıyla oluşturulmaktadır. Bazı termosetlerde, fenolik reçineler gibi, uçucu bazı maddeler yan ürün olarak oluşmaktadır (bir kondensasyon reaksiyonu). Poliester ve epoksi gibi reçineler ise, herhangi bir uçucu yan ürün çıkarmayan bir kür mekanizması ile oluşturulmakta ve

böylece işlenmesi çok daha kolay olmaktadır. Termosetler kür edildikten sonra ısıtıldıklarında bir daha sıvı hale gelmezler, fakat belirli sıcaklığın üzerinde mekanik özellikleri önemli ölçüde değişecektir. Bu sıcaklık camsı geçiş sıcaklığı olarak bilinmekte (T_g) ve geniş ölçüde kullanılan reçine sistemine, kür derecesine ve doğru şekilde karıştırılmış olmasına dayanmaktadır. T_g sıcaklığının üzerinde termoset malzemenin moleküler yapısı, rijit kristalinden daha esnek olan, amorf yapıya doğru değişim gösterir. Bu değişim geri T_g sıcaklığının altına soğutma işleminde tersinir olmaktadır. T_g sıcaklığının üzerinde, reçine modülü gibi özellikler, sert bir şekilde düşer ve bunun bir sonucu olarak sıkıştırma ile kesme gerilimleri sonucu kompozitinki de düşer. Suya karşı direnç ve renk stabilitesi gibi diğer özellikler de, reçinenin T_g sıcaklığı üzerinde fark edilebilir ölçüde düşer [16].

Bunun yanı sıra bir çok farklı reçine çeşidi kompozit endüstrisinde kullanılmakta olup, yapısal parçaların büyük kısmında üç temel reçine sistemi tercih edilmektedir: poliester, vinilester ve epoksi [16].

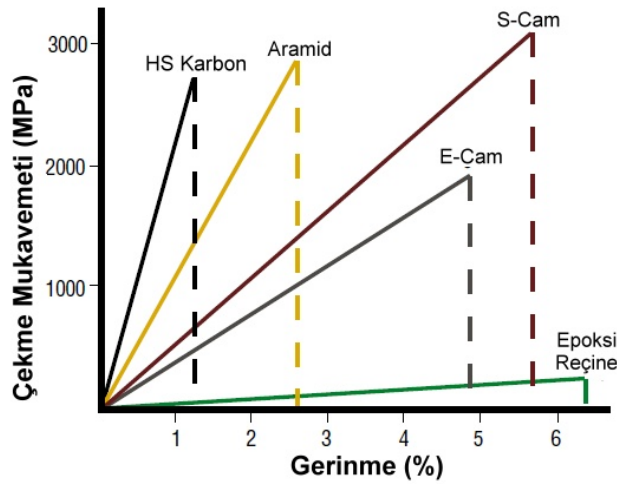
3.1.1. Reçine sistemlerinin mekanik özellikleri

Şekil 3.1’de ‘ideal’ reçine sistemleri için gerilim-gerinme eğrisi görülmektedir. Bu eğrideki reçine için yüksek mukavemet, yüksek rijitlik (eğri eğiminden) ve yüksek kırılma uzaması gibi özellikler sıralanabilmektedir. Bu eğriden bu reçinenin öncelikli olarak rijit, fakat aynı zamanda kırılğan olmadığı yorumu çıkarılabilmektedir [16].



Şekil 3.1: Genel olarak bir reçineye ait gerilme-gerinme diyagramı [16].

Bir kompozit yapı gerilmeye maruz kaldığında, fiber bileşenin tam mekanik özelliklerine ulaşabilmek için, reçine sisteminin de en az fiber kadar deforme olabilme kabiliyetine sahip olmalıdır. Şekil 3.2. 'de çeşitli malzemeler için gerilme-gerinme diyagramı verilmiştir (diyagram malzemelerin kompozit hallerine ait değildir). Buradan örneğin bir S-cam fiber'in kopmadaki uzaması 5.3% olduğunda, maksimum çekme özelliklerine ulaşılabilmesi için, kopmadaki uzama değeri en az bu değer olan bir reçine sistemine ihtiyaç duyulmaktadır [16].



Şekil 3.2: Farklı malzemelere ait gerilme-gerinme diyagramının karşılaştırılması [16].

3.1.2. Reçine sistemlerinin yapışma özellikleri

Reçine ile fiber takviye arasında, her reçine sisteminde yüksek yapışma olmalıdır. Bu iyi yapışma özellikleri sayesinde, kompozit malzemeye uygulanan çeşitli yüklerin etkili bir biçimde transfer edildiği garanti altında alınarak ve kırılma veya fiber/reçine ayrışması önlenmiş olur [16].

3.1.3. Reçine sistemlerinin dayanım özellikleri

Dayanım bir malzemenin kırılmaya karşı gösterdiği direncin ölçüsüdür, fakat bir kompozit malzeme içerisinde bunun kesin bir biçimde ölçülmesi oldukça zor olabilmektedir. Bununla birlikte, bir reçine sisteminin gerilme-gerinim eğrisi tek başına malzemenin dayanımı hakkında bazı ip uçları vermektedir. Genel olarak reçine kırılma öncesi ne kadar çok deformasyon kabul ederse, o ölçüde dayanımı ve kırılma direnci de yükselecektir [16].

3.1.4. Reçine sistemlerinin çevresel özellikleri

Çevreye, suya ve diğer agresif maddelere karşı toplam direnç ile birlikte, sürekli çevrimsel gerilime karşı dayanım özellikleri herhangi bir reçine sisteminin temel bileşenleridir. Bu özellikler, spesifik olarak deniz ortamında büyük bir önem kazanmaktadır [16].

3.2. Poliester Reçine Sistemi

Poliester reçineler en yaygın biçimde kullanılan reçine sistemleri olup, özellikle deniz endüstrisinde tercih edilmektedir. Poliester reçineler ‘doymamış’ tiplerdir. Doymamış poliester reçine, doğru koşullara maruz bırakıldığında sıvı veya katı durumdan kür edilebilen bir termosettir [16].

3.2.1. Kimyasal yapı

Bilindiği üzere bir baz ile asidin reaksiyonundan tuz elde edilmektedir. Benzer şekilde organik kimyada, bir alkol ile bir organik asidin reaksiyonu sonucu bir ester ve su çıkmaktadır. Glikol gibi özel alkoller, di-bazik asitler ile birlikte kullanıldığında, poliester ve su elde edilmektedir. Bu reaksiyon, doymuş di-bazik asitlerin ve çapraz bağ oluşturuvcu monomerler gibi bileşiklerin katkısıyla beraber, poliester elde etmenin temel üretim prosesini oluşturmaktadır. Bunun bir sonucu olarak, farklı asitler, glikoller ve monomerlerin kullanımı ile farklı özellikler gösteren çok sayıda poliester oluşturabilmektedir [16].

Kompozit endüstrisinde standart laminasyon sistemleri olarak kullanılan iki temel poliester reçine mevcuttur. Ortoftalik (orthophthalic) poliester reçine türü yaygın olarak kullanılan standart ekonomik reçine sistemidir. İzofthalik (isophthalic) poliester reçine ise, özellikle denizcilik endüstrisinde, ön plana çıkan su direnci gibi özellikleri nedeniyle tercih edilen malzeme haline gelmektedir [16].

Bir çok poliester reçine, genellikle monomeri stiren olan bir poliester solüsyondan oluşan viskoz ve soluk renkli bir sıvıdır. Stiren’in 50%’ye kadar ilavesi, reçinenin viskozitesini azaltarak daha kolay işlenmesini sağlamaktadır [16].

Poliester reçinelerin sınırlı bir raf ömrü vardır, çünkü uzunca bir sürenin sonunda kendi kendilerine jelleşmeye başlarlar. Bir çok kez bu jelleşmeyi yavaşlatmak için, üretim prosesi süresince belirli miktarda inhibitörler kullanılır [16].

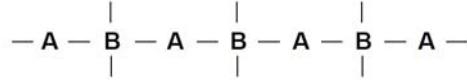
3.2.2. Poliester reçine karışımı

Bir reçinenin kalıplama amaçlı olarak kullanılabilmesi için ilave olarak bazı yardımcı maddelere ihtiyaç vardır. Bunlar genellikle [16]:

- Katalizör
- Akseleratör
- Katkılar: Tikotropik, pigment, dolgular, kimyasal/ateşe karşı direnç

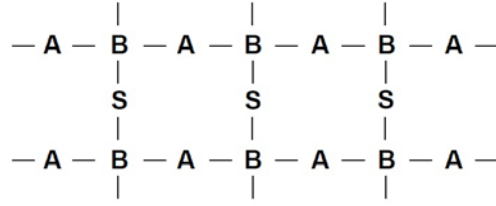
Reçineler kalıpcının ihtiyaçları doğrultusunda formüle edilerek, basitçe katalizörün kalıplama öncesi ilave edilmesiyle, hazır hale getirilebilmektedir. Daha önce de bahsedildiği gibi, bir reçine yeterli süre bekletilirse, doymamış bir poliester reçine kendi kendine jelleşmeye başlayacaktır. Bu şekilde gerçekleşen bir polimerizasyonun hızı, pratik amaçlı kullanımda çok yavaş olmaktadır ve bu nedenle, katalizör ve hızlandırıcılar kullanılarak, reçinenin uygun bir zaman periyodu içerisinde polimerizasyonuna ulaşılır. Katalizörler, hemen kullanımdan önce reçine sistemine ilave edilerek, polimerizasyon reaksiyonun başlatılması sağlanır. Katalizör kimyasal reaksiyonda yer almaz ancak sadece basitçe prosesi aktive eder. Bir hızlandırıcı ise, katalize edilmiş bir reçineye ilave edilerek, reaksiyonun atölye koşullarında ve sıcaklıklarında gerçekleşmesine olanak sağlar veya daha yüksek hızlarda ilerlemesine izin verir. Hızlandırıcılar, katalizörün yokluğunda reçine üzerine çok az miktarda etkileri olduğundan, bazen poliester üreticisi tarafından reçineye ilave edilerek bir ‘ön-hızlandırılmış’ reçine üretilir [16].

Poliester’in moleküler zincirleri Şekil 3.3’deki gibi basitçe ifade edilebilmektedir. Burada ‘B’ ile molekölün reaktif taraflarına dikkat çekilmektedir [10].



Şekil 3.3: Kür edilmemiş bir poliester reçinenin şematik gösterimi [16].

Stiren ‘S’ ilavesiyle birlikte ve bir katalizörün varlığında, stiren polimer zincirlerini her bir reaktif bölgeden çapraz bağlarla birleştirerek yüksek kompleks üç boyutlu bir ağ yapısı oluşturur (Şekil 3.4) [16].



Şekil 3.4: Kür edilmiş poliester reçinenin şematik gösterimi [16].

Bunun sonunda poliester reçine ‘kür edilmiş’ olarak adlandırılır. Artık kimyasal olarak dirençli (ve genellikle) sert bir katı haline gelmiştir. Çapraz bağ oluşturma veya kür prosesi ‘polimerizasyon’ olarak adlandırılır. Tersinir olmayan bir kimyasal reaksiyondur. Ani yükler olduğunda poliester tabakaların kırılğan olarak davranması, molekül zincirlerin gösterdiği bu ‘uca – uç’ çapraz bağın doğasından kaynaklanmaktadır [16].

Kalıplama öncesi reçine karışımı çok dikkatli olarak hazırlanmalıdır. Reçine ve tüm katkıları, katalizör ilave öncesinde eşit dağılım sağlamak üzere dikkatli bir şekilde karıştırılmalıdır. Bu karıştırma işlemi mükemmel ve dikkatli bir şekilde yapılmalıdır, çünkü reçine karışımına herhangi bir hava girişi olması durumunda, kalıplama kalitesini büyük ölçüde etkileyecektir. Özellikle takviye edici malzeme tabakaların bulunması durumunda, hava kabarcıkları nihai lamine yapının içerisine yerleşerek yapıyı zayıflatabilir. Aynı zamanda en iyi malzeme özelliklerini elde edebilmek için ilave edilen katalizör ile hızlandırıcı miktarı çok dikkatli ölçülerek ilave edilmeli ve böylece polimerizasyon kontrol altında tutulmalıdır. Fazla miktarda katalizör katkısı jelyasyon süresini hızlandırırken az miktardaki katkısı ise kür işleminin tam olarak gerçekleşmemesine neden olacaktır [16].

Reçine karışımının renklendirilmesi pigment katkısı ile gerçekleştirilebilmektedir. Doğru pigment malzemesinin seçimi ile çok düşük oranlardaki katkısı dahi kür reaksiyonunu etkileyebileceği gibi lamine yapıyı da olumsuz etkileyebilmektedir. [16].

Dolgu malzemeleri geniş ölçüde poliester reçineleri ile birlikte bir çok nedenle kullanılmaktadır [16]:

- Kalıplama bedelini düşürmek için;
- Kalıplama işlemini kolaylaştırmak için;
- Nihai yapıya en iyi özellikleri vermek için.

Dolgu malzemeleri, yüksek miktardaki katkıları ile lamine yapının esneklik ve çekme dayanımı gibi özelliklerini etkilemesine rağmen, sıkça reçine ağırlığının 50% oranlarına kadar ilave edilmektedir. Belirli dolgu malzemelerin katkısı ile aynı zamanda lamine yapıda, yanma dayanım özelliğinde artış da sağlanabilmektedir [16].

3.2.3. Kür mekanizmaları

Poliesterin monomer ile kopolimerizasyonun başlatılması genellikle organik peroksit katalizör katkısı ile gerçekleşmektedir. Bazı katalizörler oda sıcaklığında reaktif olurken, bazıları ise reaksiyonu başlatabilmek için değişken sıcaklık değerlerine ihtiyaç duyar. Lamine yapılarda en yaygın kullanılan ve 113 ile 154°C aralığında kür reaksiyonu gerçekleşen katalizörler, benzoil peroksit ve tertiary butylperbenzoate'dir. Metil etil keton peroksit ile kobalt naftenat'a dayanan sistemler daha çok ortam sıcaklığında tercih edilmektedir. Reaksiyon geliştiriciler veya hızlandırıcılar reçineye, daha düşük kür sıcaklıklarına ihtiyaç duyulduğunda ilave edilmektedir. Yaygın olarak kullanılan geliştiriciler arasında kobalt octoate gibi organometalik tuzlar, dimetil anilin ile birlikte kullanılmaktadır. Bazı sistemlerde aynı zamanda geciktiriciler veya inhibitörler de bulunur. Geciktiriciler ekzoterm piklerini düşürürler ve inhibitörler ise erken zamandaki polimerizasyonu önlerler [12].

Çeşitli poliester tipleri için kür hızı onun asit, monomer ve daha az miktarda glikol bileşenlerine bağlı olmaktadır. Belirli bir reçine sistemi için kür hızları ile jelleşme süreleri, katalizör ile reaksiyon geliştirici bileşen miktarlarının bir fonksiyonudur. İnhibitör ve geciktiriciler kür ile jelleşme sürelerini arttırır. Katalizör ile reaksiyon geliştirici ise hiçbir zaman beraber karıştırılmamalıdır çünkü bir patlama veya alevlenme ile sonuçlanabilmektedir [12].

Poliester kür prosesin karakteristikleri, reaksiyon bir kere başlatıldığında, sonlanana kadar devam eder ve herhangi bir noktasında durdurulamaz. Doymamış esterlerin 92-95%'i tüketildiğinde kür prosesi tamamlanmıştır. Bazı sistemlerde post kür işlemi ile doymuşluk arttırılabilmektedir [12].

3.2.4. Mekanik özellikler

Poliester'in mekanik özellikleri büyük ölçüde formülasyonuna bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Döküm ile üretilerek hazırlanmış olan rijit reçinelerin sınırlı verilerinden 69 ile 76 MPa arasında değişen maksimum çekme dayanımında 2.0% gerinme tespit edildiği görülmüştür. Buna karşı bükme dayanımı 110 ile 117 MPa arasında ve yaklaşık 4137 MPa'lık bir elastisite modülü kaydedilmiştir. Daha esnek reçine sistemleri için 8.0%'den daha yüksek gerinmeler ile beraber daha düşük çekme dayanımları, esnekliğe bağlı olarak gözlemlenmiştir. Genel amaçlı poliester reçine sistemleri için bazı mekanik özelliklere ait veriler Tablo 3.1'de sunulmuştur [12].

Tablo 3.1: Poliester reçinelerin bazı mekanik özellikleri [12].

| Özellikler | Rijit Döküm |
|---|----------------------|
| Bükme Dayanımı (MPa) | 115 |
| Bükme Modülü (GPa) | 4.76 |
| Çekme Dayanımı (MPa) | 72.4 |
| Kırılmada Uzama (%) | 1.8 |
| Basma Dayanımı (MPa) | 155 |
| Darbe Dayanımı (Nm/m) | 21.4 |
| Su absorpsiyonu (24 h, %) | 0.21 |
| 1.8 MPa yük altında sıcaklık sapması (°C) | 90 |
| Termal Genleşme, 10-52°C arası (cm/cm°C) | 6.3×10^{-5} |
| Sertlik (Barcol) | 48 |

3.2.5. Termal özellikler

Tablo 3.2’de genel amaçlı poliester reçine sistemleri için termal özelliklere ait bazı değerler verilmiştir [12].

Tablo 3.2: Genel amaçlı bir poliester sistemi için bazı termal özellikler [12].

| Özellik | Rijit Döküm |
|--|----------------------|
| 1.8 MPa yük altında ısıl ayrılma (°C) | 194 |
| Termal genleşme katsayısı (10-52° aralığında, cm/cm°C) | 6 x 10 ⁻⁵ |

Poliestere alevlenme geciktirici özellikleri, fosfor veya halojenlerin moleküler yapıya ilave edilmesi ile kazandırılmaktadır. Bu özelliği sağlamak üzere farklı çok sayıda bileşen eklenebilmektedir. Bunun yanı sıra modifiye edilmiş reçine sistemine antimon oksit de ilave edilerek daha da geliştirilebilmektedir. Ancak alev dayanımının artmasının yanında mekanik özellikler olumsuz etkilenmektedir [12].

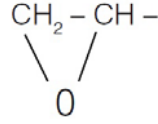
3.2.6. Kimyasal direnç

Daha önce de belirtildiği gibi poliesterin kimyasal direnci geniş ölçüde kimyasal yapısı doğrultusunda değişmektedir. Yüksek derecede direnç vinilesterler ve izoftalik poliesterler ile elde edilmektedir. Vinilesterler (veya kombinasyonları), asit, halojene edilmiş organikler, kostikler ve belirli solventlerin de dahil olduğu bir çok uygulamada kullanılabilir [12].

3.3. Epoksi Reçine Sistemi

Geniş epoksi reçine yelpazesi, günümüz reçine sistemleri arasında en yüksek performansı sergileyen bazı tipleri ile temsil edilmektedir. Epoksiler çoğunlukla mekanik özellikler ve çevresel bozulmaya karşı direnç karakteristikleri açısından bir çok reçine tipinden üstünlük sergileyerek, havacılık sanayiindeki yaygın olarak tercih edilmektedir. Lamine edici bir reçine olarak, yüksek yapışma özellikleri ve su ile ayrılmaya karşı direnci, bu reçinenin gemi inşaatında kullanılmasını ideal hale getirmektedir. Burada Epoksiler geniş ölçüde birincil konstrüksiyon malzemesi olarak yüksek performans gemilerinde veya ikincil bir uygulama olarak kabuğu soyulmuş kısımların kaplanması, su nedeniyle ayrılmış poliester reçinelerin yerine veya jel kaplama olarak kullanılabilir [16].

“Epoksi” terimi, iki karbon atomuna bağlı olan bir oksijen atomunun oluşturduğu kimyasal bir grubu tanımlamaktadır. En basit epoksi şekli, “alfa epoksi” veya “1,2-epoksi” olarak bilinen, üç bölümlü bir zincir yapısından oluşmaktadır. İdealize edilmiş kimyasal yapı Şekil 3.5’de gösterilmiş olup herhangi bir kompleks epoksi molekülünün en basit tanımlanmış olan karakteristiğidir [16].

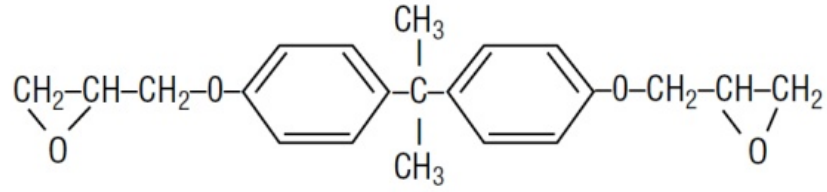


Şekil 3.5: Basit bir epoksi (etilen oksit) grubunun idealize edilmiş kimyasal yapısı [16].

Genellikle kahverengi ile koyu sarı rengi ile tanımlanabilen epoksi reçineler çok sayıda yararlı özelliklere sahiptir. Hem sıvı reçine hem de kür katkıları düşük viskoziteli ve kolayca proses edilebilen bir sistem oluşturmaktadır. Epoksi reçineler kür katkısına bağlı olarak, 5 ile 150°C arasındaki sıcaklıklarda kolay ve hızlı olarak kür edilebilmektedir. Epoksi reçinelerinin büyük avantajlarından biri olan ve aynı zamanda yapının iç stresini minimize eden özellik, kür işlemi süresince gösterdikleri düşük büzülme oranlarıdır. Yüksek yapışma mukavemeti ve yüksek mekanik özellikler de aynı zamanda yüksek elektriksel yalıtım ve çok iyi kimyasal dayanım ile daha da arttırılmaktadır. Epoksiler yapıştırıcı, mühürleyici birleşen, döküm bileşeni, cila, boya ve bir çok endüstriyel uygulama için lamine edici reçine olarak kullanım bulmaktadır [16].

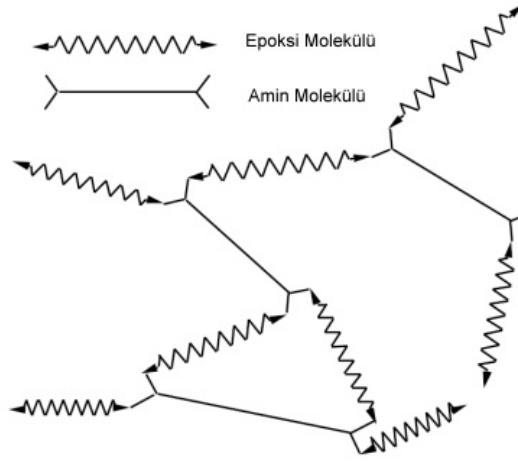
Epoksi reçineler uzun bir molekül zincir yapısından, vinilestere benzer olarak, her iki uçta reaktif kısımlar ile şekillendirilmektedir. Ancak epoksi reçinelerde bu reaktif taraflar, ester grupları yerine epoksi grupları tarafından oluşturulmaktadır. Ester gruplarının olmaması, epoksi reçinenin oldukça yüksek su dayanımına sahip olduğunu göstermektedir. Epoksi molekülleri merkezlerinde, hem mekanik hem de termal stresleri lineer gruplardan daha iyi absorplayan ve böylece epoksi reçineye çok iyi rijitlik, tokluk ve ısı dayanımı özellikleri sağlayan, iki halka grubuna sahiptir [16].

Şekil 3.6’da tipik bir epoksiye ait idealize edilmiş kimyasal yapı görülmektedir. Burada moleküler zincirler arasında yine ester grubunun yer almadığı görülebilmektedir [16].



Şekil 3.6: Tipik bir epoksiye ait idealize edilmiş kimyasal yapı [16].

Epoksilerin poliestерlerden farkı, bunların katalizörden ziyade sertleştirici ile kür edilmeleridir. Sertleştirici çoğu durumda bir amin grubudur ve yer aldığı reaksiyonun kimyasal açılımı, genellikle iki epoksi ucunun her bir amin tarafına bağlandığını ifade eder. Bu yapılar, Şekil 3.7’de görüldüğü üzere kompleks üç boyutlu moleküler yapılarıdır [16].



Şekil 3.7: Epoksi reçinenin şematik gösterimi (kür edilmiş 3D yapısı) [16].

Amin grupları epoksi molekülleri ile sabit bir oranda reaksiyona girdiklerinden, tam bir reaksiyon gerçekleştiğinden emin olmak için, reçine ile sertleştirici arasında doğru bir karışım oranının sağlandığı konusunda emin olunmalıdır. Eğer amin ile epoksi doğru oranda karıştırılmaz ise, reaksiyona girmemiş reçine veya sertleştirici matris içerisinde kalır ve kür edilmiş yapının nihai malzeme özelliklerini etkiler. Reçine ile sertleştirici oranını doğru olarak belirlemek için, üreticiler ağırlık veya hacimsel açıdan kolayca ölçülerek ulaşılabilen formülasyonlar verirler [16].

3.4. Vinilester Reçine Sistemi

Bu rijit ve tok özellikli doymamış termoset plastikler hem vinil gruplarının peroksit katalizör ilaveli polimerizasyonu, hem de hidroksil gruplarının oda veya daha yüksek sıcaklıklarda anhidril çapraz bağlanması ile kürlenmektedir. Kür edilmiş bisfenol-A vinilesterler kimyasal direnç ile karakterize edilmektedir; epoksi novolak vinilesterler çözelti ve ısı dayanımı ile; yanmaz (alev almayan) ve tüm tipler genel olarak tok ve esnek olarak tanımlanır. Diğer bir çok ticari takviyeli plastikler ile karşılaştırıldığında, yüksek korozif veya kimyasal bir çevrede istisnasız yüksek dayanım özellikleri sağlamaktadırlar. Yapısal kompozitlerde, tabaka kalıplama bileşenlerinde ve kimyasal cihazlarda kullanım bulmaktadır [13].

Vinilester reçineler hem poliester hem de epoksi reçinelerin en iyi özelliklerini birkaç uzlaşma ile kombine etmektedir. Dayanımı epoksi ile benzerdir ancak daha ucuz ve işlenmesi daha kolaydır. Yüksek sıcaklıklarda takviyeli plastiklerde yüksek dayanım ve saldırgan ortamlara karşı direnç ile karakterize edilirler. Aynı zamanda darbe ve yorulmaya karşı iyi direnç göstererek suya karşı düşük geçirgenlik ile kabarmayı düşürürler. Elektriksel ve termal yalıtım özellikleri de mükemmeldir. Uyum ve cam, grafit ile aramid fiberleri ile bağ oluşturma özellikleri de iyidir [13].

Geleneksel bisfenol poliester reçinelerden farklı olarak, tekrar eden birimlerde değil de sadece zincir sonunda doymamışlık göstererek, daha az ester bağlantılarına sahiptirler. Terminal çiftli bağlar daha tok ve esnek bir reçine yapısı oluştururken yukarıdaki nedenden ötürü ise gelişmiş kimyasal direnç sergilerler. Epoksi temelli vinilester, yüksek sıcaklıklarda özellikle iyi kimyasal direnç sağlar. Elastomer ile modifiye edilmiş epoksi vinilester, yüksek tokluk ve uzama sağlarken, gelişmiş yapışma dayanımı ile birlikte aşınmaya ve bazı mekanik gerilimlere karşı üstün direnç gösterirler. Vinilester aynı zamanda daha düşük maliyette belirli sınırlı özelliklerde gelişme sağlamak için kimyasal olarak modifiye edilebilmektedir [13].

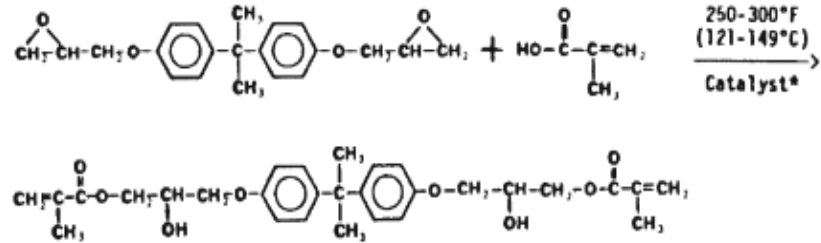
3.4.1. Kimyasal yapı

Vinilesterler epoksi reçinelerin etilen açısından doymamış karboksilik asitler ile gerçekleştirdikleri reaksiyonların ürünleridir. Vinilester reçineler, plaka kalıplama karışımı (sheet molding compound) üretiminde kullanılan Grup II metal oksit ve

hidroksitlerin yoğunluğunu arttırma amaçlı tasarlanmış olan bazı özel tipleri dışında tipik olarak terminal doymamış kısımlara sahiptirler. Reçinenin sahip olduğu terminal doymamış kısımlar, ya vinilester reçinenin homopolimerizasyon ile ya da stiren gibi doymamış monomerlerin kopolimerizasyonu ile çapraz bağlar oluşturmak üzere reaksiyona girecektir [22].

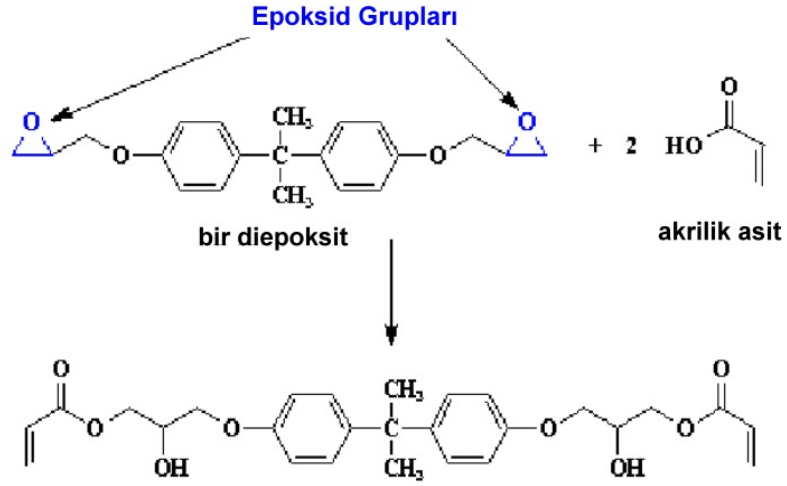
En yaygın olarak bilinen vinilesterler, bir diperoksit reçinenin metakrilik asit veya akrilik asit gibi bir monokarboksilik doymamış asit ile esterleştirilmesinden (estere dönüştürme reaksiyonu) elde edilmektedir. Stirenleştirilen doymamış poliester reçineler gibi kullanılmak üzere, sıvı bir reçine elde edebilmek için epoksi metakrilat veya epoksi akrilatlar serbest radikal kür reaksiyonlarında yalnız veya stiren gibi doymamış monomerler içerisinde çözünerek kullanılabilir [23].

Temel bir vinilesterin hazırlanmasında kullanılan bisfenol A epoksi reçine gibi basit bir diglisidil eter ile metakrilik asit bileşenleri ile gerçekleştirilen reaksiyon Şekil 3.8'deki gibi özetlenebilmektedir [23]:



Şekil 3.8: Temel bir vinilester oluşum reaksiyonu (*benzil trimetil amonyum klorit katalizörü eşliğinde) [23].

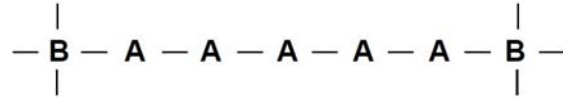
Diğer bir deyişle bir diepoksit akrilik asit veya metakrilik asit ile reaksiyona sokularak Şekil 3.9'da gösterilen sonuç elde edilmektedir. Sonrasında vinilester grupları polimerize edilerek çapraz bağlı bir reçine yapısı elde edilir [24].



Şekil 3.9: Vinilester oluşum reaksiyonu [24].

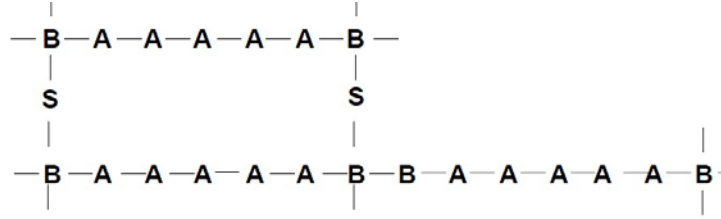
Vinilester reçinelerin kompozit amaçlı kullanımında metakrilik asitler en yaygın olarak kullanılırken, akrilik asitler daha çok kaplama amaçlı kullanılacak olan reçinelerde tercih edilmektedir. Kronotonik ve sinamik asitlerin doymamış asitlerde tercih edildiği görülmüştür [23].

Şekil 3.10'da gösterilmiş olan zincir yapısı, daha öncesinde Şekil 3.3'de sunulmuş olan şematik poliester yapısı ile karşılaştırıldığında, reaktif bölgelerin pozisyon farkı anlaşılabilir [6].



Şekil 3.10: Vinilester reçinenin (kür edilmemiş) şematik gösterimi [6].

Azaltılmış ester grup yapısına sahip vinilester poliester ile karşılaştırıldığında, reçinenin hidroliz ile bozulma eğilimi daha azdır. Kür edilmiş vinilesterin moleküler yapısı da aynı zamanda poliester göre daha tok bir yapı sergilemektedir (Şekil 3.11) [6].



Şekil 3.11: Kür edilmiş vinilester reçine yapısının şematik gösterimi [6].

3.4.2. Kimyasal ve mekanik özellikler

Vinilester reçineler doymamış poliesterler ile karşılaştırıldıklarında, daha yüksek tokluk ve kimyasal direnç özellikleri sergilerler [23].

Vinilester üretiminde kullanılan epoksi reçinenin ana zincir yapısı, bu reçine tipine tokluk ve daha yüksek çekme uzaması gibi özellikler katmaktadır. Vinilester reçinenin moleküler ağırlığı, tercih edilmiş olan epoksi reçinenin ana zincir yapısına bağlı olarak değişebilmektedir. Kompozit üretiminde en yaygın olarak kullanılan vinilester reçine grubu için, iki mol diglisidil eter (bisfenol A) bir mol bisfenol A ile uzatılarak epoksi ana zincirini şekillendirmektedir [23].

Bu bağlamda çekme dayanımı, uzama, reaktivlik gibi moleküler ağırlık ve ana zincir yapısına bağlı olan özellikler, bir çok farklı uygulama için farklılık gösterebilmektedir [23].

Vinilester reçinelerin üstün kimyasal direnci (doymamış poliester reçineler ile karşılaştırıldığında) kısmen epoksi ana zincirinde fenil eter birimleri ile bağlanan ester bağlarının olmamasına dayanmaktadır. İlk bahsedilen kısımlar ester bağlarına göre bir çok kimyasal ortamdaki bozulmalara karşı olduğu gibi özellikle yüksek pH alkalın durumlarında karşı daha yüksek direnç gösterirler. Vinilester reçine içerisindeki ester bağları, sadece molekül uçlarında bulunarak kimyasal saldırıya maruz kalabilen ester bağlarını minimize ederler. Ayrıca vinilester reçine molekülleri metakrilat grupları ile yok edildiğinde, metilakrilat grubunda asılı kalan geniş metil grubu ester gruplarını kimyasal saldırılardan korumaktadır [23].

Moleküllerin uçlarında mevcut olan vinil doymamışlık durumu ile, vinilester reçineler oldukça reaktif hale getirilebilmektedir. Hem homopolimer hem kopolimer olarak stiren gibi monomer gruplar, hızlı gelişen ham mukavemet ile çabuk olarak kür olma yeteneklerine sahiptirler [23].

3.4.3. Diğer özelliklere genel bakış

Vinilesterleri oluşturmak için kullanılan epoksi ana zinciri ile metakrilik/akrilik asit, geleneksel doymamış poliester reçine üretimine göre önemli ölçüde maliyetli hale getirmektedir. Ancak vinilesterin doymamış poliester reçinelere karşı sunmuş olduğu avantajlar ise aşağıdaki şekilde özetlenmiştir [23]:

1. Hem homopolimerizasyon hem de kopolimerizasyon reaksiyonlarının her ikisinde de terminal vinil doymamışlık durumuna karşı mükemmel reaktivlik gösterir.
2. Metakrilat bileşenin yok edilmesi ile, ester bağlarının metakrilat metil grubu tarafından korunması ile, hidroliz direnci arttırılmaktadır.
3. Geleneksel doymamış poliester reçinelere göre %35 ile 50 arasında daha az ester bağ oluşturma eğilimli olan hidroliz.
4. Vinilester molekülündeki ikincil hidroksillerden kaynaklı cam takviyelendirmeye karşı daha iyi ıslatma ve bağ oluşturma özelliği.
5. Eter bağları yüksek derecede asit direnci sağlayan epoksi ana zincir yapısı ile geliştirilmiş uzama ve tokluk özellikleri.

3.4.4. Kür sistem ve bileşenleri

Vinilesterler oda sıcaklığında veya yüksek sıcaklıklarda, en yaygın olarak kullanılan stiren monomeri ile, kür karışımların yardımıyla, kür edilebilmektedir [23].

Oda sıcaklığındaki kür sistemleri genellikle metal sabunların birinci promoterler (reaksiyon geliştirici) olarak dönüşümüne ve keton peroksitlerin katalizörlüğüne dayanmaktadır. Kobalt naftenat, oktat veya neodekanat gibi kobalt sabunları, oda sıcaklığında reçine kür işlemini ve aynı zamanda iyi kür davranışları ile uzun paketleme ömrü sağlayan, yaygın kullanım bulan metalik reaksiyon geliştiricileridir. Diğer birincil metalik reaksiyon geliştiriciler arasında manganez, vanadyum, kalsiyum ve baryum yer almaktadır [23].

Bir çok ticari reçine çift reaksiyon geliştirmecisine sahiptir (birincil ve ikincil reaksiyon geliştiricileri) [23]:

1. Jelleşme sonrası kür işlemini hızlandırmak.
2. Çoğunlukla sadece kobalt katkılı reçinelerde, jel reaksiyon süresince görülen yaşlanma olayını stabilize etmede yardımcı olmak.

Kobalt ilaveli oda sıcaklığında kür edilecek olan reçinelerdeki katalizör katkısında, metil etil keton peroksit muhtemelen en yaygın kullanılan katalizördür. Bu peroksit saf bir bileşen değildir ve farklı oranlarda peroksit, hidrojen peroksit ve serbest su gibi bileşenleri bünyesinde barındırabilir. Ticari olarak bir çok MEKP katalizörleri mevcuttur [23].

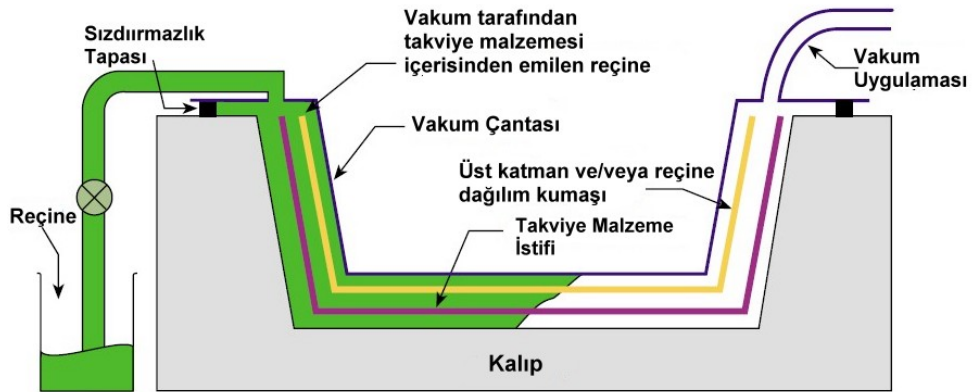
4. VAKUM (DÜŞÜK BASINÇ) (REÇİNE) İNFÜZYON YÖNTEMİ

4.1. Vakum İnfüzyon Yöntemine Giriş

Vakum veya diğer bir deyişle reçine infüzyon tekniği özellikle yüksek kalite, hızlı (kısa çevrim süresi) ve temiz üretiminin önemli olduğu, denizcilik endüstrisinin yanı sıra büyük ve kompleks uygulamalarda, popülaritesi artan bir üretim şekli haline gelmiştir [25].

Bir vakum (veya reçine) infüzyon prosesinde, kuru takviye malzemesine sıvı reçineyi emdirmek için itici güç olarak vakum (atmosferik basınçtan daha düşük olan bir basınç) uygulanır. Prosesin farklı varyasyonları mevcut olup bunların bazıları patentleşmiştir (örneğin, “Seemann composites resin infusion moulding process” ile kısaltılmış adı SCRIMP’dir) [25].

Prosesin en yaygın kullanılan türlerinde, kuru takviye malzemesi (ve eğer kullanılmakta ise öz/core malzeme) bir kalıba yerleştirilir ve ardından bir vakum çantası (vacuum bag) ile örtülür. Vakum uygulanarak bir kap içinde bulunan reçineyi emerek vakum çantasının içerisinde bir hat boyunca (simetri hattı, örneğin tekneler için ortada yer alan şerit) ilerler (Şekil 4.1) [25].



Şekil 4.1: Vakum infüzyon yöntemi genel işleyişi [16].

Bir vakum infüzyon prosesin amacı reçineyi mümkün olduğunca hızlı olarak nihai konumuna getirmek ve az boşluk içeriğine sahip bir parça üretmektir. Reçine, takviye- ve öz malzeme tedarikçileri günümüzde özellikle vakum infüzyon prosesi için geliştirilmiş ürünler sunmaktadır [25].

Tipik bir el ile yerleştirme işleminde, takviye malzemeleri kalıba manuel olarak yerleştirilip aynı şekilde manuel olarak fırça, rulo vb. yardımıyla ıslatılır. Bu yöntemdeki gelişme ise bir vakum çantası kullanarak reçinenin emilmesi ve tüm bu manuel işlemlerden kaçınmış olmaktadır. [26].

4.2. Vakum İnfüzyon Yönteminde Kullanılan Ekipmanlar ve Üretim Adımları

Öncelikli olarak bu yöntemde, üretim akışı ile beraber her bir üretim adımında yer alan hazırlık aşaması ile nihai ürün özelliklerini etkileyen parametreler ve faktörler açıklanacaktır.

Şekil 4.2’de tüm adımları gerçekleştirilmiş ve uygulamaya hazır bir parçanın enine kesiti görülmektedir [27].



Şekil 4.2: Üretim adımları sonrası uygulamaya hazır bir parçanın enine kesiti (SCRIMP şeması) [27].

4.2.1. Kalıp

Kalıp hazırlanarak, takviye malzemesi ile akış ortamı ve/veya öz/çekirdek malzemeler seçilir [26].

Herhangi bir laminasyon prosesindeki gibi, vakum infüzyon yönteminde de kaliteli bir kalıp gerekmektedir. Kalıp rijit ve parlak yüzeyli olmalıdır. Kalıp uygun şekilde temizlendikten sonra, tercih edilen kalıp ayırıcı uygulanır. Reçine infüzyon yöntemi için sıra dışı kalıp ayırıcılarına ihtiyaç duyulmaz [26].

Her lamine yapı için takviye malzemesinin seçimi önemli bir adımdır, fakat infüzyon yönteminde kullanılmak üzere seçilen takviye malzemesinde göz önünde bulundurulması gereken ilave faktörler mevcuttur. Aşağıda bazı örneklerle malzeme seçiminin nasıl etkiler yaratacağı açıklanmıştır [26]:

Cam fiber vakum infüzyon yönteminde en yaygın şekilde kullanılan takviye malzemesidir. Çoğu cam fiber kumaşları yüksek geçirgenlik sağlayarak reçinenin kolaylıkla içerisinden akışına izin verirler. Genel olarak daha gevşek örgüler, daha sıkı olanlara kıyasla, daha yüksek geçirgenlik sergilerler. Eğer örülmemiş bir kumaş kullanılacak ise, sürekli iplik yapısı kesilmiş iplik yapısında göre daha üstün infüzyon sağlayacaktır. İkisi de yüksek oranda geçirgenlik sağlarken, kesilmiş iplik yapısındaki bağlayıcı bir şekilde reçine akışını engellemektedir. Sürekli iplik yapısı bu problemin oluşumunu önleyecektir. Birleştirilmiş (knit) kumaşlar, yapıları gereği sıkça infüzyon prosesinde kullanılmaktadır. Bu kumaşlar örülmüş değildir, fakat örülmüş yapıların neden olduğu katlanmalardan kaçınmak için birbirine birleştirilmiştir. [26].

Daha kompleks şekilli kalıplarla çalışırken, kuru takviye malzemeleri kolayca düz bir şekilde oturmaz. Bunu engellemek için çözüm olarak yapıştırıcının sprey kullanımı tavsiye edilir. Kalıp yüzeyine ince bir tabaka yapıştırıcı püskürtülerek üzerine takviye malzemesi yerleştirilir. Bu yapıştırıcı, takviye malzemesini doğru yerde sabitlemeye yeterli olacaktır. Bu yapıştırıcı reçine infüzyon veya kür prosesini etkilemeyecektir [26].

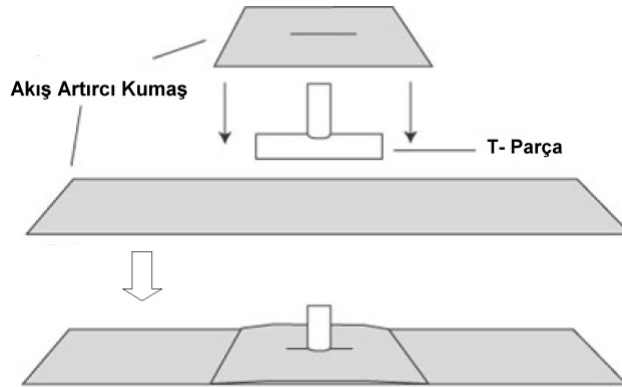
Vakum infüzyon prosesinde reçine lamine yapıya sabitlenmiş nokta veya noktalardan giriş yapar ve yönlendirilir. Reçine her zaman daha az direncin olduğu yolu seçecektir. Ancak maalesef bir çok takviye malzemesi, reçine akışını engelleyecek büyük bir direnç oluşturabilmektedir. Reçinenin akış direncini azaltmak için, akış ortamı (flow media) devreye girer [26].

Akış ortamı tipik olarak tek tabaka halinde takviye katmanları arasına yatay olarak yerleştirilerek reçine için kolay akış kanalları sağlayacaktır. Bu malzeme de sonunda lamine yapının bir parçası haline gelir [26].

4.2.2. Reçine ve vakum yollarının belirlenmesi

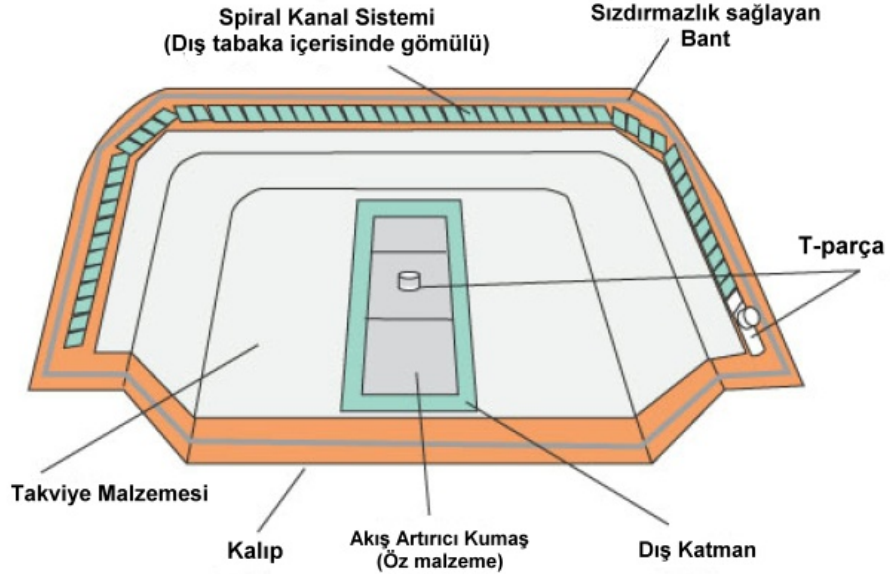
Vakum çantası kapatılmadan önce vakum ve reçine yollarının yer belirlenmesi dikkatlice düşünülmelidir. Reçine genellikle sabit bir kaynaktan beslenmektedir. Vakum çantası kapatılmadan önce reçine besleme yolları belirlenip yerleştirilmelidir. Aynı zamanda reçinenin yapıya girişini sağlamak üzere uygulanacak olan vakum için kullanılan kanal sistemi de belirlenmelidir [26].

Şekil 4.3’de görülen işlemde kullanılan peel ply (reçine akışını ve uniform dağılımını kolaylaştıran), dizilmiş fiber takviyelerin, özellikle yüksek hacim oranlarında, emdirme özelliklerini geliştirilir. Böylece infüzyon süresi kısaltılarak oldukça büyük parçalar yüksek fiber hacim oranlarında daha kısa sürede üretilebilir. Bu uygulamanın temel dezavantajını kullanılan malzemelerin, parçanın mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemesi oluşturmaktadır [28].



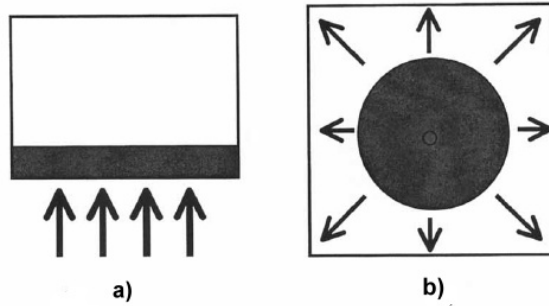
Şekil 4.3: Reçine giriş yollarının tasarlanması ve peel ply kumaşın kullanılması [28].

Şekil 4.4’de ise görüldüğü üzere burada örnek olarak verilmiş tasarımda kalıbın ortasında reçine giriş bölümü yer alırken, kalıp kenarlarında ise spiral kanal sistemi ile vakum kanalları yer almaktadır [28].



Şekil 4.4: Reçine ve vakum yollarının belirlenmesi [28].

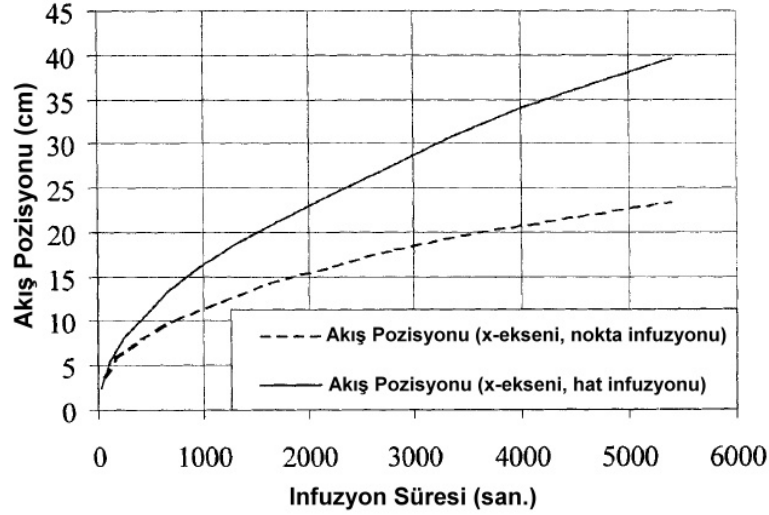
Bu yöntemde en büyük sorunlardan birisi, özellikle büyük yapıların infüzyonu söz konusu ise, infüzyonu en kısa çevrim süresi içerisinde gerçekleştirmektir. Bunun ötesinde infüzyon stratejisine bağlı olarak (infüzyon tasarımı) ilave üretim masrafların oluşumu beklenmelidir. Bu durumu örnekleyerek açıklamak üzere nokta ve hat infüzyon çalışması gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.5) [29].



Şekil 4.5. İnfüzyon stratejileri: a) Nokta ve b) hat infüzyonu [29].

Her iki yöntemin kendine göre avantaj ve dezavantajları vardır. Örneğin nokta infüzyonu ile sızdırma ve buna bağlı olarak oluşan süre kayıpları minimize edilmiştir. Buna ilave olarak talaşlı işleme gerek kalmadan nihai şekilde parça üretilebilir. Tüm bunlara rağmen bu yöntemle infüzyon süresi uzun olmaktadır. Hat veya kenar infüzyonu durumunda ise infüzyonun daha kısa sürede tamamlanması beklenirken, sızdırmadan kaçınmak kolay olmamaktadır. Bunların yanı sıra bitmiş üründe talaşlı işlem ile düzeltmeler gerekerek ilave masraflar oluşabilmektedir [29].

Infüzyon sürelerini görselleştirmek için yapılan bir çalışmada Şekil 4.6'daki sonuçlar elde edilmiştir. Buradan da anlaşılacağı üzere hat infüzyonu ile zamansal kazanç sağlanmaktadır [13].



Şekil 4.6: Deneysel çalışma sonucu nokta ve hat infüzyonun süresel karşılaştırılması [13].

Bir vakum infüzyon prosesinde reçinenin parça içerisine doldurulma süresini belirleyen faktörler aşağıdaki şekilde sıralanabilir [25]:

- reçinenin vizkositesi,
- takviye (lerin) geçirgenliği,
- uygulanmış olan basınç farkı (vakum ile atmosfer basıncı arasındaki fark),
- reçine akış mesafesi.

4.2.3. Vakum çantası ve reçine kanallarının bağlanması

Kuru takviye malzemeleri yerleştirildikten sonra, vakum çantası hazırlanır. Vakum çantası sıkı, fakat kalıp içerisinde yer alan tüm bileşenler ile kanal yapısına yeterli miktarda yer sağlayacak şekilde olmalıdır. Çok sıkı veya gevşek olursa reçine fazlasına ya da uygunsuz infüzyona neden olabilmektedir [26].

Vakum çantası kurulduktan sonra vakum ile reçine yolları bağlanır. Vakum pompasını çalıştırılmadan önce reçine hattının kapalı olduğundan emin olmak gerekir. Çünkü reçine girişinden önce vakum uygulandığında, reçine kanalı geçici olarak kapatılması gereken bir “sızdırma” gösterecektir [26].

Vakum infüzyon prosesi süresince, vakum basıncı uygulanarak reçine lamine yapı içerisine itilir. Bir çok durumda reçine kuru kalan bazı noktaları hala doldururken, lamine yapının diğer bölümlerine de emilecektir. Bu durum normaldir, fakat reçinenin infüzyon işlemi süresince sık sık vakum hattına girmemesine dikkat edilmelidir [26].

4.2.4. Vakum pompası

Tüm bileşenler yerleştirildikten sonra vakum pompası bağlanır. Reçine akışı uygulanan vakum ile sağlandığından güçlü bir pompa kullanımı gerekmektedir. Pompa montajı gerçekleştirildikten sonra vakum pompası çalıştırılır ve sızıntıların olmadığı kontrol edilir. Buradaki en küçük sızıntı dahi, performansın büyük ölçüde düşmesine ve hatta parçanın tamamen kullanılmaz hale gelmesine neden olabilmektedir [26].

4.2.5. İnfüzyon hazırlığı ile reçine seçimi

Reçine seçimi de bu yöntemin önemli faktörlerinden birisidir. Reçine seçimindeki önemli parametrelerden birisi, reçine viskozitesidir. Tipik olarak düşük viskozite infüzyon işlemini kolaylaştırıp yardımcı olacaktır. Fakat buradan yüksek viskoziteli reçinelerin kullanılamayacağı anlamı çıkarılmamalıdır. Yüksek viskoziteli reçineler kullanılacağı takdirde daha dikkatli bir planlama yapılarak, daha fazla reçine kanalları ile akış artırıcı yapılar kullanılmalıdır [26].

4.2.6. Reçine infüzyonu

Tüm yerleştirmeler tamamlandığında reçine hazırlanır. Reçine besleme ünitesinin uygunluğu kontrol edilerek, reçine kilit sistemi açılır. Reçine hızlı bir şekilde kanaldan lamine yapıya emilmelidir [26].

Reçine lamine yapıya bir kez ulaştığında, besleme hattı hızlı bir şekilde dolacaktır. Bundan sonra ise reçine takviye malzemesi içerisinde genişleyerek ilerlemeye başlayacaktır. İnfüzyon oranı bir çok değişkene bağlı olmakla birlikte, reçinenin hareketi görsel olarak takip edilebilir seviyede olmalıdır. Tüm lamine yapı doyana kadar işlem devam ettirilir [26].

Tüm yapı doyduğunda reçine besleme ünitesi ile bağlantı kesilmelidir, çünkü besleme ünitesindeki malzeme tamamlanıp yapı içerisine hava girişi olasılığı doğabilmektedir. Bu da yapı içerisinde, parçanın çeşitli özelliklerini olumsuz etkileyecek olan hava birikintilerin oluşumuna neden olabilmektedir. [26].

Yukarıdaki proses kademelerinde ve kullanılan malzemeler gereği takviye malzemesinin yerleştirme düzeni ile hacimsel oranı, takviye malzemesinin sıkıştırılabilirliği, reçine viskozitesi, geçirgenlik, infüzyon stratejisi (vakum ve reçine kanalların yerleşimi), bir akış arttırıcı tabakanın varlığı vb. gibi yapının nihai özelliklerini etkileyecek olan faktörler sıralanabilmektedir [29].

Reçinenin parça içerisindeki dağılımını hızlandırmak için çeşitli teknikler kullanılabilir. Bunlar [25]:

- Taşıyıcı bir katmanın (yüzey ortamı) en üst takviye katmanı ile vakum çantası arasına yerleştirilmesi.
- Takviye katmanları arasına tabakalar arası bir katmanın yerleştirilmesi.
- Özellikle akış arttırıcı tabaka (öz malzeme) arası kesik kanalların veya olukların yerleştirilmesi.

Taşıyıcı/tabakalar arası katman gözenekli bir dağıtım ortamı yaratarak (örülmemiş malzemeye benzer) reçinenin içerisinden kolayca akabilen bir yol sağlar. Reçine bu düzlemsel katman içerisinde kolayca dağılır ve takviye arasındaki daha çok zaman alan çapraz akışı başlatır. SCRIMP yönteminde örneğin, taşıyıcı bir katman doğrudan yeniden kullanılabilir olan vakum çantasının altına yerleştirilir [25].

4.3. Vakum İnfüzyon Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları

Yöntemin avantajları aşağıdaki şekilde özetlenebilmektedir [30]:

- Prosesin kalitesi operatörün çalışma becerisine bağlı değildir. Proses tasarlandığında parça kalitesi istikrarlıdır.
- Lamine kalitesi, açık kalıp işleminde olduğundan daha yüksek olmaktadır. Araya sıkışmış hava olmayacak, lamine yapı mükemmel bir biçimde birleştirilmiş ve et kalınlığı sabit olacaktır.
- Minimum düzeyde parça büzülmesi ve çarpılma
- Kaburga, öz ve dirsek benzeri kompleks yapıları bulunan parçalar, hepsi bir arada tek bir adımda gerçekleştirilebilir.
- Parça net boyda hazırlanarak son (talaşlı) işlem süresi azaltılabilir.
- Parçanın kalıplanmamış yüzeyi, eğer bir iç kalıp kullanılırsa daha iyi bir bitirme yüzeyine sahip olabilir.
- Daha hızlı çevrim süresi.
- Buharlaşan organik bileşenler havayı kirletmemektedir.
- Bu yöntemle gelişmiş bir takviye-reçine oranı sağlayarak mukavemeti artırıp ağırlığı düşürür; fiber ile reçine özelliklerini maksimize eder.

Yöntemin dezavantajları ise [30]:

- Malzeme ve tedarik masrafları yüksektir.
- Talaşlı işleme (son adım) masrafları yüksektir.
- Her ürün kendine has bazı proses geliştirmelerine ihtiyaç duyabilmektedir.

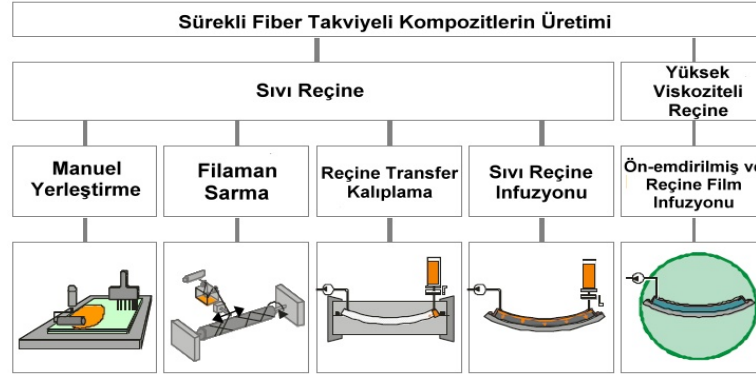
Bu yöntemin uygulama alanları arasında [30]:

- Laminasyonu zor ve kompleks şekilli parçalarda.
- Yüksek kaliteli lamine yapı gerektiren parçalarda (hava boşluğu olmayan, mükemmel laminasyon takviyelendirilmesi gerektiren).
- Düşük büzülme ve çarpılmaya ihtiyaç duyan parçalar.
- Öz malzemelerin kullanıldığı parçalar.
- Çeşitli iç yapı ve kıvrımları olan parçalar.
- Kalıplanmamış yüzeyde iyi bir yüzey özelliği gerektiren parçalar.
- Geniş ölçüde son adım işlenmesine ihtiyaç duyan parçalarda.

4.4. Yöntemin Diğer Uygulamalar ile Karşılaştırılması

Daha önce de bahsedildiği gibi prosesin farklı varyasyonları mevcut olup bunların bir çoğu patentleşmiştir. Bu varyasyonlara örnek RIFT (resin infusion under flexible tooling), VARTM (vacuum assisted resin injection moulding) ve LRI (Liquid Resin Infusion) eklenebilir [31].

Şekil 4.7’de bu örneklerin bazıları görsel olarak sunulmuştur [32].



Şekil 4.7: Kompozit üretim teknolojisi [32].

Vakum infüzyon yöntemi diğer tekniklerle karşılaştırıldığında, aralarında çok fazla fark olmamakla birlikte, temelde aynı prensibe dayandığı görülmektedir. Tüm ticari isim kazanmış patentli yöntemlerle beraber, küçük farklılıklar ile daha kısa sürede, daha kaliteli, optimum özellikler sergileyen parçaların üretimi amaçlanarak sürekli olarak yeni gelişmeler hedeflenmektedir.

5. BALİSTİK VE PERSONEL ZIRHLANMASI

5.1. Giriş

İnsan vücudunu çeşitli yaralanmalara karşı korunması, eski savaşçıların çatışma sırasında bronz, bakır ve demir gibi malzemelerden zırhlar kullandıkları tarih kadar eskiye dayanmaktadır. Günümüzde silahlı kuvvetler, polis memurları, güvenlik çalışanları ve spor yarışmalarında yer alan atletlerin vücudu koruyan ekipmanlar kullanmaları artık sıradan hale gelmiştir. Sporda kullanılan koruyucular ile balistik yeleklerden, bahçıvanlıkta kullanılan dikene karşı koruyucu eldivenlere kadar, bunları giyen kişiler bu zırhlı malzemelerin onları bir çok yaralanmaya karşı koruyacağına inanır ve aynı zamanda da hafif ve kullanışlı olma beklentisi mevcuttur [33].

Yaralanmalara neden olabilecek durumlar çok fazladır ve belirli problemler için çeşitli vücut zırh çözümleri bulunmasının yanı sıra, insan yapımı korumanın doğa vücut korumasına karşı, özellikle darbe sorunu ile yaşamsal organların hasarı bir çok kez tek bir ekipmanın tasarımında birleşerek göz önünde bulundurulmaz. Ekipman tasarımında asıl sorular cevap bulmalıdır. Darbe hızı, kütle, kuvvet, impuls, enerji veya momentuma karşı hangi önemli nokta korunmalı? Bu faktörlerin yarattığı etkilerden hangisi, bir koruyucu katmandan geçişi sırasında en çok azaltılabilmektedir ve farklı koruyucu tasarım/malzemeleri bunları farklı derecelerde mi gerçekleştiriliyor [33].

Teknolojik açıdan bakıldığında, vücut zırhlanması günümüzde, birbiriyle kıyaslanabilecek ölçüde olan malzeme sistemleri ve üreticileri ile oldukça iyi gelişmiş olmasına karşılık, günümüzde zorlayıcı olan taraf ise özellikler arasında daha iyi bir denge sağlayan bir mühendislik çalışması ile ergonomik gelişme ve diğer ekipman ve giysilerle birleştirme çalışmalarıdır. Bu doğrultuda askeri piyasa oldukça gelişmiştir ve işin zorlu ve fırsatlarla dolu olan tarafı ise ağırlığı minimum düzeyde tutmaya çalışırken, koruma derecesini arttırmaktır [33].

1970'lerde modern vücut zırh kavramı doğduğundan bu yana, balistik fiberler daha güçlü hale gelerek, üreticilerin daha hafif, daha esnek zırh malzemesi üretmesine olanak sağlamıştır. Fiber teknolojisindeki bu gelişmeler, zırh yapımında sürekli artan bir esneklik sağlamıştır [33].

Yumuşak vücut zırh yapımında kullanılan temel iki fiber aramid ile polietilendir. Kevlar, Twaron ve Technora hepsi aramidken, Dyneema ve Spectra polietilen grubunda yer almaktadır. Bunlar kurşunları yavaşlatarak darbeyi yumuşatan, vücut zırh malzemeleri olarak, hafif otomatik silahların ateşlemesine karşı az miktarda koruma sağlamaktadır [33].

Silahı durdurmak problemin sadece bir parçasıdır. Kevlar gibi, esnemeyen, ipliklerin kullanıldığı kumaşlardan üretilen yumuşak zırh yeleklerinde, kurşun frenlendiğinde enerji absorblanmakta ve etkilenen fiberlerden örgü olarak kumaş içerisinde yer alan diğer fiberlere aktararak dağıtmakta ve nihai olarak vücuda geçmektedir. Vücuda gerçekleşen bu ani darbe travma olarak bilinmekte ve yaralanma meydana gelmeyecek seviyede tutulmalıdır. İnsan vücudu bir dereceye kadarki belirli travmalara karşı dayanabilmektedir ve bu tolerans vücut zırhlarının testleri süresince milimetre olarak işaretlenmektedir [33].

İlk sorun gerçek bir saldırıyı simüle etmekte yatar, örneğin kuvvete, enerjiye, momentuma, hıza ve bunları zamansal bölge içerisindeki değişimlerine karar verilmesi gibi. Vücut zırhlarının test edilmesinde mevcut sistemde balistik deneyler kullanılmaktadır [33].

Bu bölümde yukarıdaki durumlar ayrıntılı olarak ele alınarak incelenecek ve değerlendirilecektir.

5.2. Personel Zırhlanma Standardı

5.2.1. Standardın amaç ve kapsamı

Bu standardın amacı, silah ateşlemelerine karşı koruma niyetliye tasarlanmış olan personel (personel) vücut zırh malzemelerinin balistik dayanımına yönelik minimum performans gerekliliklerini ve test yöntemlerini belirlemektir [34].

Bu standart, Eylül 2000 tarihli “NIJ Standard-0101.04”ün bir revizyonudur. Bu standart 2005 tarihli “NIJ 2005 Interim Requirements”, “NIJ Standard-0101.04” ve diğer tüm revizyonları ile buna ilave olan diğer tüm standartların yerine geçmektedir [34].

Bu standardın kapsamı sadece balistik direnç (dayanım) ile sınırlıdır bıçak ve keskin aletlerin neden olduğu tehditleri, farklı olmalarından ötürü içermez [34].

5.2.2. NIJ vücut zırh sınıflandırması

Bu standart kapsamında bulunan personel vücut zırhları, balistik performans derecesine göre beş gruba sınıflandırılmıştır (IIA, II, IIIA, III, IV). Buna ilave olarak, özel bir test sınıfı daha tanımlanarak, zırh malzemesinin diğer beş standart sınıfı tarafından kapsanmamış olan tehditlere karşı da geçerli olması amaçlanmıştır [34].

Type IIA (9 mm; 40 S&W): Yeni ve hiç giyilmemiş olan Tip IIA zırhları, 8.0 g ile 373 ± 9.1 m/s’lik hız ile belirlenmiş olan 9 mm’lik Full Metal Jacketed yuvarlak uçlu (FMJ RN) (Şekil 5.1) kurşun ile 11.7 g ve 352 ± 9.1 m/ hız ile belirlenmiş olan 40 S&W Full Metal Jacketed (FMJ) (Şekil 5.1) kurşunları ile test edilmelidir [34].



Şekil 5.1: Yuvarlak ve sivri uçlu ile 40 S&W FMJ [35, 36].

Tip IIA zırhları koşullandırılmış olarak, 8.0 g ile 355 ± 9.1 m/s’lik hız ile belirlenmiş olan 9mm’lik FMJ RN kurşun ile 11.7 g ve 325 ± 9.1 m/s hız ile belirlenmiş olan 40 S&W FMJ kurşunları ile test edilmelidir [34].

Type II (9mm; 357 Magnum): Yeni ve hiç giyilmemiş Tip II zırh malzemesi 8.0 ve 398 ± 9.1 m/s'lik hız ile belirlenmiş olan 9 mm'lik FMJ RN kurşun ve 10.2 g ve 436 ± 9.1 m/s'lik hız ile belirlenmiş olan 357 Magnum Jacketed Soft Point (JSP) (Şekil 5.2) kurşunları ile test edilmelidir [34].



Şekil 5.2: Jacketed Soft Point (JSP) kurşuna ait örnek [36].

Tip II zırh malzemesi koşullandırılmış olarak, 8.0 ve 379 ± 9.1 m/s'lik hız ile belirlenmiş olan 9 mm'lik FMJ RN kurşun ve 10.2 g ve 408 ± 9.1 m/s'lik hız ile belirlenmiş olan 357 JSP kurşunları ile test edilmelidir [34].

Type IIIA (357 SIG; 44 Magnum): Yeni ve hiç giyilmemiş Tip IIIA zırh malzemesi 8.1 g ve 448 ± 9.1 m/s'lik hızda 357 SIG FMJ düz uçlu (FN) kurşunu ve 15.6 g ile 436 ± 9.1 m/s hızda 44 Magnum Semi Jacketed Hollow Point (SJHP) kurşun ile test edilmelidir [34].



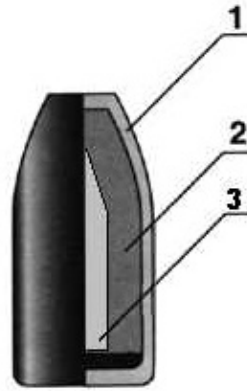
Şekil 5.3: Semi Jacketed Hollow Point (SJHP) [36].

Tip IIIA zırh malzemesi 8.1 g ve 430 ± 9.1 m/s'lik hızda 357 SIG FMJ düz uçlu (FN) kurşunu ve 15.6 g ile 408 ± 9.1 m/s hızda 44 Magnum SJHP kurşun ile test edilmelidir [34].

Type III (Rifles/yivli): Tip III sert zırh malzeme veya plaka eklemeleri koşullandırılmış olarak, 9.6 g ve 847 ± 9.1 m/s'lik hızda, 7.62 mm FMJ, steel jacketed kurşun ile test edilmelidir [34].

Tip III yumuşak zırh malzeme hem yeni hem de koşullandırılmış durumda, 9.6 g ve 847 ± 9.1 m/s'lik hızda, 7.62 mm FMJ, steel jacketed kurşun ile test edilmelidir [34].

Type IV (Armor Piercing Rifle/Zırh delici yivli): Tip IV sert zırh malzeme veya plaka eklemeleri koşullandırılmış durumda, 10.8 g ile 878 ± 9.1 m/s hızda 30 kalibre zırh delici kurşunlar ile test edilmelidir [34].



1. Metal Manto
2. Kurşun İç kısım
3- Çelik Çekirdek

Şekil 5.4: Zırh delici kurşun [36].

Tip IV esnek zırh malzeme hem yeni hem de koşullandırılmış durumda, 10.8 g ile 878 ± 9.1 m/s hızda 30 kalibre zırh delici kurşunlar ile test edilmelidir [34].

Özel Tip: Yukarıda sıralanmış olan tiplerden farklı ve herhangi bir koruma derecesi için özel bir gereklilik isteyen bir alıcı, test deviri ile hızları açık ve tam olarak belirlemeli ve bu standardın diğerlerinden farklı bir konumda tutulması gerektiğini belirtmelidir. Tablo 5.1'de yukarıda sıralanmış olan kurşun tip ve test koşulları özetlenmiştir [34].

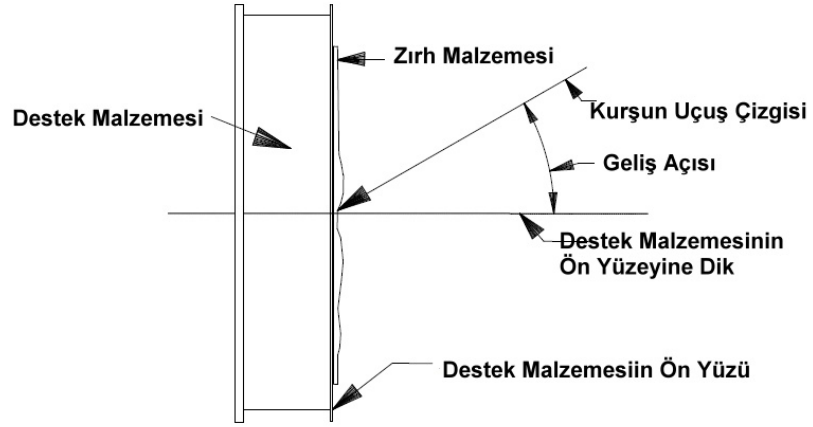
Tablo 5.1: Standart özet tablosu [34].

| Test Değişkenleri | | | | Performans Koşulları | | | | Atış Koşulları | | | | |
|-------------------|--------------|---|----------------|----------------------|-----------|----------------|-------------|----------------|---------|----------|---------|---------|
| Test | Kurşun | Standart | Yeni Zırh | Levha başına | Maksimum | Levha başına | Levha | Levha | Gereken | Gereken | Gereken | Gereken |
| Zırh Tipi | Ağırlığı | Zırh Test | Test Hızı* | 0° açıda vuruş | BFS | 30° veya 45° | başına atış | boyutu | Levha | Levha | Levha | Levha |
| Atış | Test Kurşunu | Hızı* | Test Hızı* | açıda vuruş** | Derinliği | açıda vuruş** | başına atış | boyutu | Durumu | Durumu | Durumu | Durumu |
| IIA | 1 | 9 mm FMJRN | 8.0g (124 gr) | 355m/s (1165ft/s) | 4 | 44mm (1.73 in) | 2 | 6 | Büyük | Yeni | 4 | 24 |
| | 2 | .40 S&W FMJ | 11.7g (180gr) | 325m/s (1065ft/s) | 4 | 44mm (1.73 in) | 2 | 6 | Küçük | Standart | 2 | 12 |
| II | 1 | 9 mm FMJRN | 8.0g (124 gr) | 379m/s (1245ft/s) | 4 | 44mm (1.73 in) | 2 | 6 | Büyük | Yeni | 4 | 24 |
| | 2 | .357 Magnum JSP | 10.2g (158 gr) | 408m/s (1340ft/s) | 4 | 44mm (1.73 in) | 2 | 6 | Küçük | Standart | 2 | 12 |
| IIIA | 1 | .357 SIG FMJ FN | 8.1g (125 gr) | 430m/s (1410ft/s) | 4 | 44mm (1.73 in) | 2 | 6 | Büyük | Yeni | 4 | 24 |
| | 2 | .44 Magnum SJHP | 15.6g (240 gr) | 408m/s (1340ft/s) | 4 | 44mm (1.73 in) | 2 | 6 | Küçük | Standart | 2 | 12 |
| III | 1 | 7.62mm NATO FMJ | 9.6g (147 gr) | 847m/s (2780ft/s) | 6 | 44mm (1.73 in) | 0 | 6 | Bütün | Standart | 4 | 24 |
| IV | 1 | .30 Caliber M2 AP | 10.8g (166 gr) | 878m/s (2880ft/s) | 1-6 | 44mm (1.73 in) | 0 | 1-6 | Bütün | Standart | 4-24 | 24 |
| Özel | - | Her test uygulaması zırh üreticisi veya uygulayıcı tarafından belirlenir. Zırh performansı ve atış gereksinimleri zırh tipine bağlıdır. | | | | | | | | | | |

5.2.3. Önemli tanımlar

Yardımcı Balistik Paneller: Yardımcı balistik paneller, birincil zırh numunesinden sökülebilen zırh komponentleri olup, karşılaştırılabilir balistik koruma sağlamaktadırlar [34].

Geliş Açısı: Kurşun uçuş çizgisi ile destek malzeme yüzeyine dik olan çizgi arasındaki açıyı ifade eder (Şekil 5.5) [34].



Şekil 5.5: Kurşun Geliş Açısı [34].

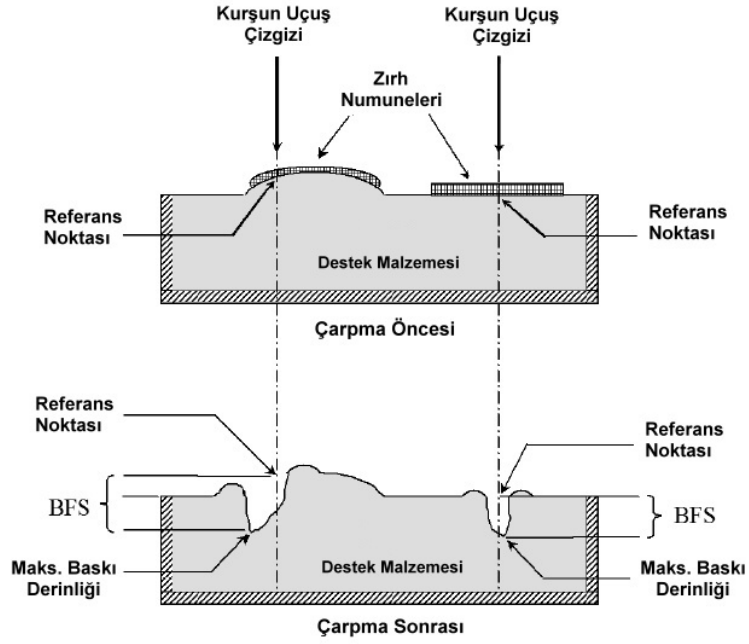
Zırh Taşıyıcı: Zırh malzeme veya panelin bir birleşeni olarak birincil görevi balistik paneli tutmak ve destek sağlayarak kullanıcıya zırh kılıfı görevi görür (bu taşıyıcı balistik direnç göstermez) [34].

Zırh Şartlandırılması: Balistik test öncesinde, teste tabi tutulacak olan zırh malzemesinin ilgili çevresel ve mekanik koşullara (sıcaklık, nem, mekanik hasar gibi) tabi tutulması [34].

Zırh Numunesi: Tam bir zırh giysisi. Tipik olarak ön tarafında bir zırh panel ile arkasında bir zırh panel ve zırh taşıyıcı toplamda bir vücut zırh numunesi oluşturmaktadır [34].

Backface Signature (BFS): Destek malzemeye giriş yapamayan bir kurşun darbesinden kaynaklı baskı derinliği. BFS, destek malzemesinin ön yüzüne paralel olan iki yüzey arasındaki dikey mesafedir. Bir yüzey, kurşun uçuş çizgisi ile eşdeğer doğrusal olan, orijinal (test öncesi) destek malzeme yüzeyi, referans noktasına

sahiptir (eğer zırh malzemesi mevcut değil ise, kurşun bu noktaya çarpar). Diğer yüzey ise destek malzemesinde en derin baskı noktasına karşı gelen noktayı temsil etmektedir. Kurşun-zırh-destek malzeme etkileşimine bağlı olarak, yüzeyler üzerinde ölçüm yerlerini tanımlayan iki nokta, kurşun uçuş çizgisi ile aynı doğru üzerinde bulunmayabilir. BFS değerlerinin ölçümü için bir örnek Şekil 5.6’da verilmiştir [34].



Şekil 5.6: BFS değerlerinin ölçümü için örnek [34].

Destek Malzemesi: Sertleşmeyen, yağ bazlı bir modelleme hamuru olan homojen bir blok, balistik test süresince zırh paneline temas halinde bulunacak şekilde yerleştirilir [34].

Destek Malzeme Fikstürü: Rijit bir çerçeveden oluşan ve arka tarafı değiştirilebilir olan bir kutudur. İçerisinde destek malzemesi bulunmaktadır. Değiştirilebilir olan arka kısmı daha BFS belirlemede kullanılmakta olup balistik limit testinde kullanılmamaktadır [34].

Balistik Limit: Veri bir kurşun tipi için, kurşunun zırh malzemesini %50 olarak delmesi beklendiği süre içerisindeki hızı. Balistik limit tipik olarak V50 veya V₅₀ değeri olarak tanımlanmaktadır [34].

Balistik Panel: Birincil olarak balistik dirençli bir malzemeden oluşan bir zırh malzemesinin koruyucu örneği veya panelidir. Balistik panel genellikle değiştirilemeyen bir panel içerisinde bulunmakla birlikte, bu da balistik panelin bir parçası olarak varsayılmaktadır. Balistik panel genellikle bir zırh taşıyıcı içerisine yerleştirilmektedir [34].

Doğru/adaletli Atış (Fair Hit-Shot to Edge Distance/Shot to Shot Distance): Bir kurşun zırh malzemesini önceki atışlardan ve panel kenarlarından belirli min. mesafelerde vurmali. Bu mesafeli atışlar bu şekilde tanımlanır [34].

Maksimum Hız: Tablo 5.1’de verilmiş olan belirli bir tehdit çemberi için belirlenmiş referans hız ve buna ilave olan 9.1 m/s [34].

Minimum Hız: Tablo 5.1’de verilmiş olan belirli bir tehdit çemberi için belirlenmiş referans hız ve çıkarılan 9.1 m/s [34].

Kurşunun Malzemeye Girmesi (Penetration): Kurşunun zırh içerisine işlemesi olayıdır. Böyle bir olayda kurşun ya durdurulabilir veya malzemeyi deler (perforation). Sonuç, 1. kurşun tamamen malzeme tarafından kapsandığında veya saptırıldığında ve 2. hem kurşun hem de zırh malzemesine ait hiçbir parçacığın destek malzemesi içerisine girmemiş olması durumunda, ‘durma veya kısmen giriş’ olarak kabullenir. Eğer kurşunun herhangi bir parçası zırh malzemesini geçer ise sonuç ‘delinme veya tam giriş’ olarak değerlendirilmektedir [34].

Kurşunun Delmesi (Perforation): Zırh içerisinde bir delik açarak geçen kurşun darbesidir. [34].

5.3. Balistik Deney Süreci

Zırh malzemesi aşağıdaki koşulları karşılayan bir tesiste, test malzemeleri ile denenmelidir. Her bir zırh plakasına atış öncesinde ve sonrasında çevre koşulları kayıt altına alınmalı ve çevre şartları özel koşullar olmadıkça aşağıda belirtilen durumda olmalıdır [34]:

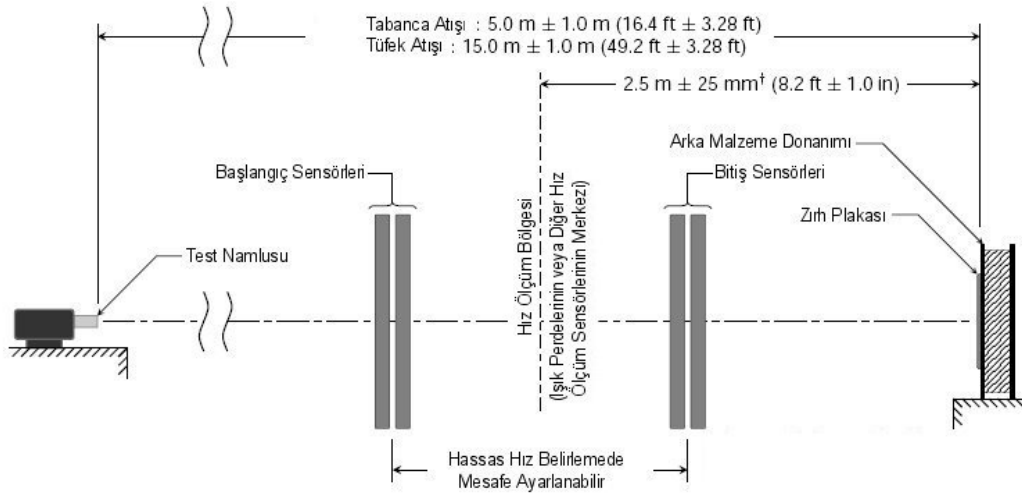
- Sıcaklık : $21^{\circ}\text{C} \pm 2.9^{\circ}\text{C}$

- Bağıl Nem : $\%50 \pm \%20$

Test malzemeleri Şekil 5.7’de görüldüğü gibi düzenlenmelidir. Özel durumlar dışında tabanca atışları için zırh plakası test namlusuna 5.0 ± 1.0 m mesafeye, tüfek atışları için ise 15 ± 1.0 m mesafeye yerleştirilmelidir. Zırh plakasına çarpma ile aşırı sapmayı olasılığını minimize etmek için veya atış koşulları sonucu mesafe ayarlanabilir. Bununla beraber atış mesafesi 4 m’den daha az olmamalıdır. Tüfek atışlarında mesafe 14 m’den daha az ayarlanırsa, mermi geliş açısının planlanan açının 5° içinde olmasını sağlamak için mermi sapması deneysel olarak belirlenmelidir [34].

Destek malzeme bağlantısı, uygun test tezgahı tarafından sıkı bir şekilde tutulmalıdır. Test tezgahı, zırh plakasını ve destek malzemeyi dikey ve yatay yönde değiştirebilecek şekilde bağlanmasını mümkün kılmalı ve destek malzeme test tezgahına monte edilmelidir [34].

Test öncesi bütün elektronik malzemeler yeterli sürede çalıştırılarak stabilizasyon sağlanmalıdır [34].



Şekil 5.7: Test aralığı konfigürasyonu [34].

Test atış hızları en az iki ayrı şekilde yerleşim kullanılarak belirlenecektir. Doğru hız ölçümleri birbirinden bağımsız her bir ölçümün 3 m/s hız içinde yapıldığı ölçümlerdir. Hız, bütün doğru hız ölçümlerinin aritmetik ortalaması alınarak kaydedilmelidir. Hız ölçümleri 1.0 m/s’den daha az değişkenlikte olmalıdır [34].

Hız, destek malzemenin ön yüzünden 2.5 ± 0.025 m mesafeden ölçülmelidir. Kronograf (Hız Ölçeği), tetikleme ekranlarıyla birleştirilerek kullanıldığında, ekranlar destek malzemenin ön yüzünden 2.5 ± 0.025 m mesafede merkezlenmelidir. Sadece açılı atışlar için ekranlar destek malzemenin $2.5 + 0.025$ m \pm 0.190 m önünde merkezlenebilirler. Bu ekranlar pozisyonlarını ve aralıklarını muhafaza etmeleri için sıkı bir şekilde monte edilmelidirler [34].

Bir atış, hedeflenen giriş açısından $\pm 5^\circ$ 'den büyük olmayan bir giriş açısı ile zırh paneline çarptığında ve balistik panelin kenarına minimum kenara-atış mesafesinde ile bir önceki atışa minimum atış-atış arası mesafesinden daha yakın olmadığında doğru/adil olarak geçmektedir. Tek bir tehdide maruz kalan zırh tipleri ve daha hafif tehdit çevrimleri için minimum kenar-atış mesafesi 51 mm'den büyük olmamalıdır. Daha ağır tehdit çevrimleri için minimum kenar-atış mesafesi 76 mm'den büyük olmamalıdır. Tablo 5.1'de hangi çevrimlerin daha hafif hangilerinin daha ağır olduğu belirtilmektedir [34].

Minimum atış-atış mesafesi 51 mm olmalıdır ve bu aralık üretici isteği doğrultusunda düşürülebilecektir [34].

Balistik sınır (Ballistic Limit/BL) testleri için kaynakçada tarif edilen uygun adetteki zırh numunesi teste tabi tutulmalıdır. Her bir balistik panel veya plaka aşağıda tariflenecek olan sürece uygun olarak test edilmelidir [34].

Bir zırh tipi için tam bir BL testi, ayrı ayrı olarak başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiş BL testlerinin, standartta belirtilen gerekli zırh numune sayısı ile birleştirilmesinden oluşmaktadır. Zırh panel veya plakaların her biri, sertifika edileceği tüm tehdit çevrimleri kullanılarak (Tablo 5.1) BL testine tabi tutulmalıdır. Tüm atışlar için giriş açısı 0° olmalıdır. Tüm numuneler kuru olarak test edilmelidir [34].

Tüm BL testleri standartta belirtilen temel prosedürü takip edilerek uygulanmalıdır. Bunların yanı sıra standartta ayrı olarak belirtilen test parametreleri uygulanmalıdır. Her bir panel için atışlar ya 12 atış gerçekleştirildiğinde ya da panele izin verilen maksimum atış sayısına ulaşıldığında tamamlanmış olarak sayılmalıdır. Her 12'lik atış serisinden sonra, ta ki standartta belirtilen gerekli atış sayısına ulaşılan kadar yeni bir seri başlatılmalıdır [34].

Zırh malzemesinin balistik sınırı, zırhı delmek için gerekli olan hıza ulaşmak zor veya imkansız olacak kadar yüksek olduğunda, laboratuvar bunu olduğu şekilde kayıtlamalıdır. Bu gibi durumlarda testler kabul edilmiş olarak kararlaştırılacaktır (gerekli minimum delik sayısına ulaşamamış olursa dahi) [34].

Tüm BL testleri raporlanmalıdır. Minimumda, atış sayısı, arzu edilen hız ile gerçek hız ve atış sonuçları şeklinde ilgili atışların bilgileri kayıtlanmalıdır [34].

Tüm zırhlar: Maksimum P-BFS doğru/adil atış hızında veya altında delinmemelidir (bu hız P-BFS referans hızı artı 9.1 m/s'lik hıza denk gelmektedir) [34].

Yeni zırhlar: Yeni koşul zırhları için BL test verileri standartta belirtildiği şekilde analiz edilmeli ve P-BFS referans hızına karşı gelen tahmini tam delinme olasılığı %5'den düşük olmalıdır [34].

5.4. Enerji Absorpsiyon Mekanizmaları

Darbe (kurşun darbesi) koruması iki yöntemle sağlanmaktadır. İlkinde çarpma süresi arttırılarak, hızlanma ve kuvvet piki düşürülür. Bu durum çarpma esnasındaki tepkiden (impulse) ölçülebilmektedir. Tepki,

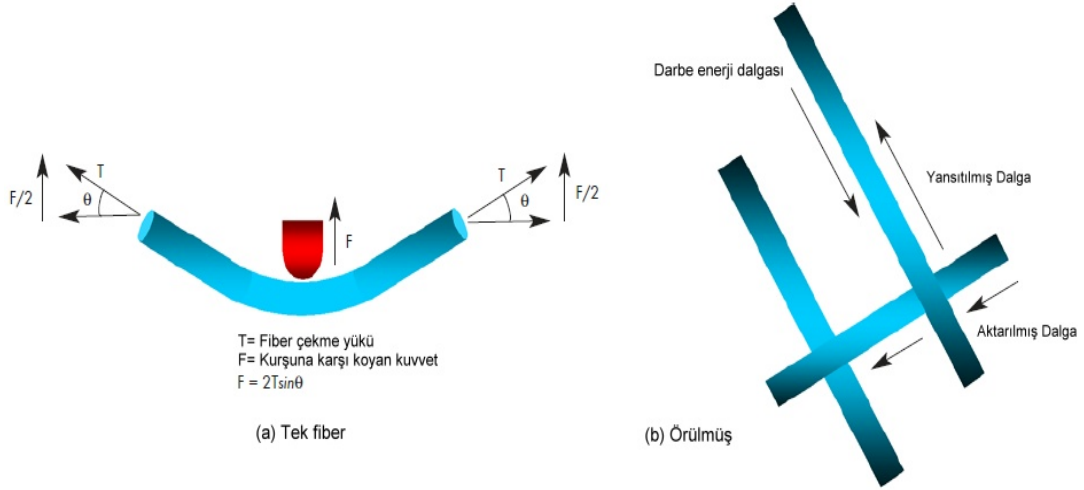
$$I = \int F(t)dt \quad (5.1)$$

ile belirlenmektedir. Burada F zamana bağlı kuvvete eşit olmaktadır, I ise tepkiye veya diğer bir deyiş ile kuvvet-zaman grafiği altında kalan alan eşittir. Aynı momentuma sahip bir çarpma aynı tepkiye sahip olacaktır. Bu nedenle kuvvet pikini düşürmenin tek yolu çarpma süresini uzatmaktır [37].

Örölmüş fiber kumaşlar ile fiber takviyeli polimer matriksli kompozitler kurşun enerjilerini farklı şekillerde azaltmaktadır. Fiberler tarafından absorplanan enerjinin miktarı büyük ölçüde, Şekil 5.8.a'da açıklanmış olan hasar oluşma eğilimlerine bağlıdır. Yüksek mukavemet ve yüksek kopma uzaması olan fiber kumaşlarda bu durum için enerjinin plastik deformasyon ve fiberleri girmesi sonucu ile absorplanması beklenmektedir. Buna ilave olarak bir fiberdeki gerinme, çarpma hızı ile kıyaslanarak, fiberin ses hızına bölünmektedir (denklem 5.2) [1].

$$\varepsilon = \frac{V}{c} \quad (5.2)$$

ε gerinme, V çarpma hızı ve c fiberin ses hızı olarak tanımlanabilmektedir [1].



Şekil 5.8: Fiber absorpsiyon mekanizmaları [1].

Dönüşteki ses hızı fiberin elastik modülü ile bağlantılı olmaktadır (denklem 5.3). Daha yüksek elastik modül, daha yüksek olan fiber ses hızına bağlı olarak, darbe enerjisi dalgası aktarımının fiberin daha uzak bölgelerine doğru gerçekleşmesine olanak sağlayarak daha büyük bir fiber hacmin kurşun enerjisini absorplaması sağlar [1].

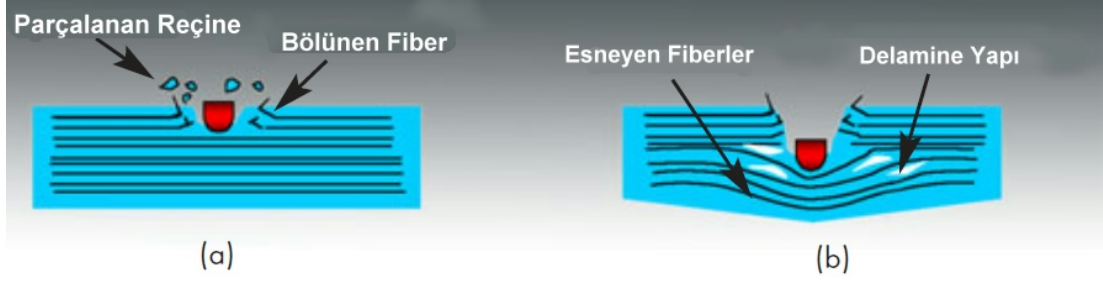
$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (5.3)$$

Burada E elastik modül, ρ ise fiber yoğunluğunu ifade etmektedir [1].

Buna karşılık örölmüş bir fiber kumaş, darbe enerjisini fiberlerin tüm ağ bağlantısında dağıtması sonucu absorplamaktadır (Şekil 5.8.b).

Fiberler bir kere bir reçine matriksi ile emdirildiklerinde deforme olma kabiliyetleri engellenmiş olur ve bunun bir sonucu olarak daha az enerji absorplayabilirler. Fiber takviyeli polimer matriksli kompozitlerde, kırılma prosesinin iki aşamada gerçekleştiği varsayılır. Yüksek hız darbeleri kompozit malzemeye lokalize olmuş baskı kuvvetleri uygularken akabinde fiberleri keserek reçinenin parçalanmasına neden olurlar (Şekil 5.9.a). Kurşun bir kere yavaşladığında kompozit fiber gerinmesi,

fiber çıkması veya delaminasyon nedeniyle deforme olur (Şekil 5.9.b). Delaminasyonu azaltmak üzere kumaş katlarının dikilmesi veya üç boyutsal fiber örgü kullanılarak, hasar küçük bir bölgeye düşürülmüş olur. Ancak bu da fiber hasarını artırarak, balistik darbe sonrası baskı mukavemetini düşürüp daha düşük yük taşıma kapasitesi ile sonuçlanır [1].



Şekil 5.9: Fiber takviyeli polimer matriksli kompozitlerde enerji absorpsiyon mekanizmaları [1].

6. DENEYSEL ÇALIŞMA

6.1. Çalışmanın Amaç ve Kapsamı

Bu çalışmanın amacı, içerisinde cam fiber kumaş ile takviyelendirilmiş vinilester reçine ve diğer katkı maddelerin kullanımıyla karışımın hazırlanması ve vakum infüzyon yöntemi yardımıyla kompozit plaka üretimini gerçekleştirmek, akabinde NJI standartları doğrultusunda gerekli atış testlerini gerçekleştirerek, üretilmiş olan kompozit malzemenin balistik uygulamalar açısından uygunluğunu tespit etmektir.

Çalışmanın sonucunda, temel farkı nano kristalin elmas toz takviye katkı miktarı olan, dört adet plakada nano kristalin elmas tozun takviye malzemesi olarak etkisi görülecektir.

Deneysel çalışma içerisinde girdi olarak kullanılacak olan, takviye malzemesi ile matriks malzemeleri, önceki bölümlerde ayrıntılı olarak ele alınmıştı. Burada bunlara ilave olarak, gerekli reaksiyonların teşviki için seçilmiş olan katkı maddeleri tanıtılacaktır.

Bunların yanı sıra bu çalışma içerisinde yer alan üretim ekipmanları ile üretim süreci ve parametreleri, deney konstrüksiyonu, bileşenleri ile etkileyici faktörler, ve test sonrası sonuçları irdelemek üzere kullanılmış olan cihazlar tanıtılacak olup, deney süreç akışı kısaca özetlenecektir.

6.2. Kullanılmış olan Hammadde ve Yardımcı Malzemeler

Cam fiber kumaş takviyeli vinilester reçine matriksli kompozit üretiminde kullanılmış olan hammaddeler aşağıda sıralanmıştır. Cam fiber, vinilester reçine ve nano kristalin elmas tozu malzemeleri önceki bölümlerde ayrıntılı olarak tariflendiğinden, burada özellikle malzemeye özgü (firma bilgileri vb.) ve diğer katkılar ile görevlerine değinilecektir.

6.2.1. Vinilester reçine

İlkalem Tic. ve A. Ş. Markalı reçinenin ticari adı Vinilester – Epoksi PV 200 olup, düşük viskozitesi nedeniyle özellikle vakum infüzyon yönteminde tercih edilen özel bir türdür.

PV-300, epoksi vinilester reçine, kimyasal korozif ortamlara karşı cam fiber takviyeli yapıların oluşturulmasında mükemmel olanaklar sağlamaktadır. Yüksek sıcaklıklarda asidik ve alkali ortamlara karşı korozyon mukavemetinin üstün olmasının yanında mekanik mukavemet ve ısı deformasyon değerlerinin yüksek olması PV-300 epoksi vinilester reçineye avantaj sağlamaktadır [38].

Sahip olduğu bu değerlerle alkali ve asidik havuzlar, stoklama tankları, boru, baca aksamaları üretilmektedir. Bisfenolik ve isoftalik poliesterlerde şüphe duyulabilecek bütün endüstriyel uygulamalar, rahatlıkla ve güvenilir biçimde vinilester reçineyle yapılabilmektedir [38].

Mekanik mukavemet, kimyasal korozif ortama dayanım, kürleşme özellikleri ve molekül yapısı itibariyle epoksi vinilester reçine, bisfenolik ve isoftalik poliesterlerden farklı bir kategori oluşturmaktadır [38].

Tablo 6.1’de bazı genel sıvı reçine özellikleri sunulmuştur. Tablo 6.2’de ise cam fiber ile takviye edilmiş ve sertleşmiş reçinenin temel mekanik özellikleri belirtilmiştir [38].

Tablo 6.1: Sıvı reçinenin genel özellikleri [38].

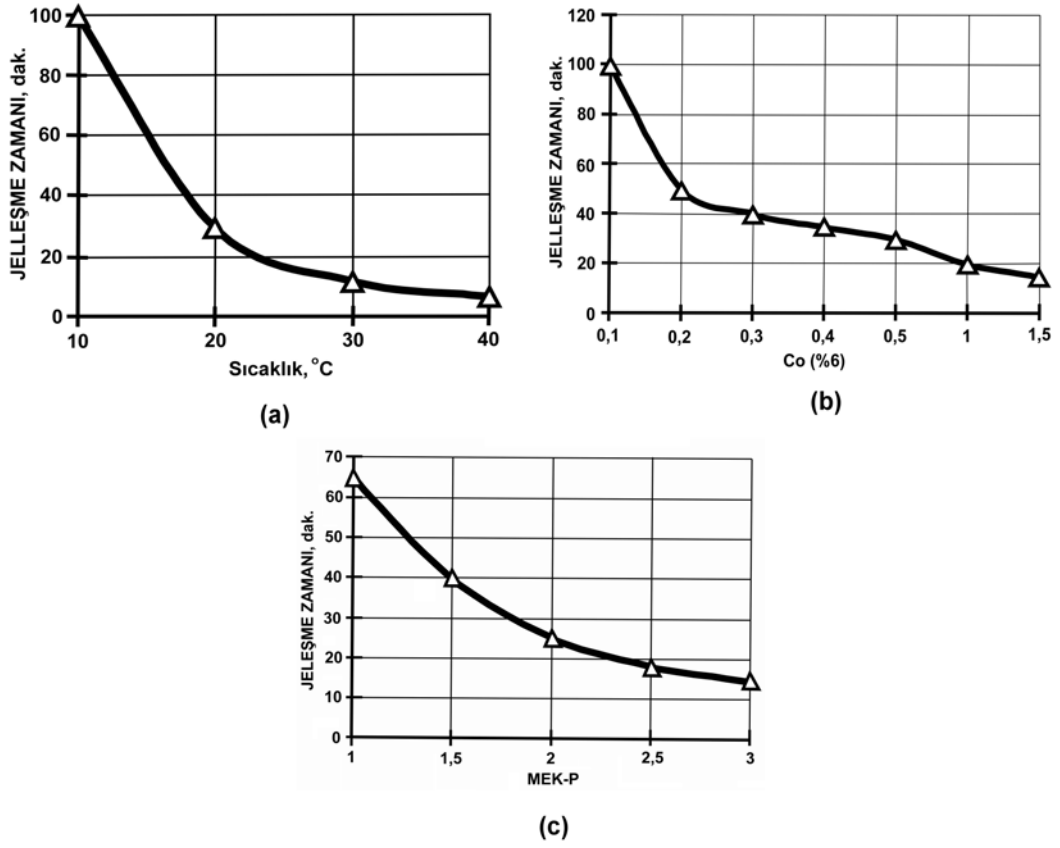
| Özellikler | İlkester PV-300 |
|--|-----------------|
| Yoğunluk, 25°C’de (g/cm ³) | 1.04-1.05 |
| Viskozite, 25°C’de (cps) | 300-400 |
| Stiren Oranı (%) | 44-45 |
| Jelleşme Süresi, (dak.): 20°C’de, %0.5 Co(%6) ve %2 MEKP | 25-35 |
| Ekzotermik ısınma (°C) | 160-170 |

Tablo 6.2: Cam fiber ile takviyelendirilmiş, sertleşmiş reçinenin mekanik özellikleri [38].

| Özellikler | İlkester PV-300 |
|-------------------------|-----------------|
| Çekme Mukavemeti (MPa) | 140-150 |
| Eğilme Mukavemeti (MPa) | 200-210 |
| E-Modülü (MPa) | 7000-7500 |

Epoksi vinilester reçinede reaktif gruplar molekül zincirinin uç bölgesinde olmasından dolayı bilinen poliesterlere göre sertleşme seyri hızlı ve kürleşme süresi oldukça kısadır. Mekanik mukavemet ve termal deformasyon değerlerinin poliesterlere göre yüksek ve çarpıcı olması da epoksi vinilester reçinenin tipik kimyasal yapısına bağlanabilmektedir. Vinilester reçineyle üretilmiş bir parçanın kalıptan çıkarılması, nakliyesi kullanılacak yerde montajı ve hizmet süresince kırılma ve çatlama olmayacağı yine kimyasal yapısıyla açıklanmaktadır [38].

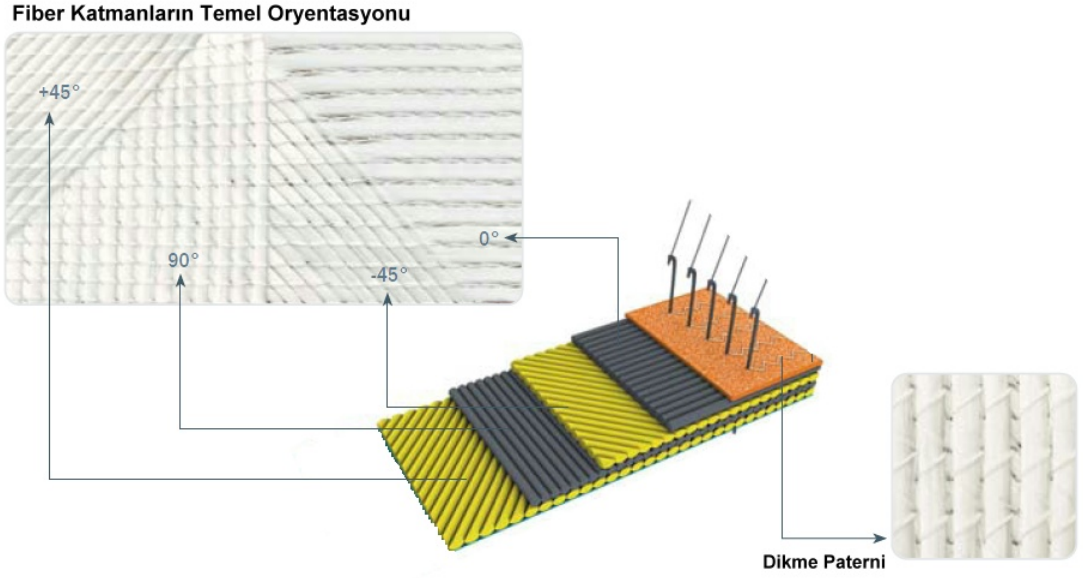
PV-300 epoksi vinilester reçine bünyesine konulan promoter ile peroksit katalizör yardımıyla sertleşme sağlanmaktadır. Şekil 6.1.a, 6.1.b ve 6.1.c'de sırasıyla sıcaklık, kobalt ve MEKP miktarları değişken olarak belirlenerek elde edilen üç grafik verilmiştir. Bu grafiklerde sıcaklık, kobalt ve MEKP miktarlarına bağlı olarak jelleşme süreleri görülmektedir. Her üç durumda da 100 g PV-300 kullanılmıştır. Birinci durumda (sıcaklık değişken) kobalt oranı 0.5 ml ve MEKP 2 ml'dir. İkinci durumda ise (kobalt değişken) MEKP 2 ml ve sıcaklık 20°C olarak belirlenmiştir. Üçüncü durumda ise kobalt yine 0.5 ml ve sıcaklık 20°C şeklinde sabitlenmiştir. Buna göre sıcaklığın, kobalt veya MEKP oranının artması ile jelleşme süresi düşmektedir [38].



Şekil 6.1: Sıcaklık, kobalt ve MEKP oranlarının değiştirilmesi ile jelleşme süresindeki değişim [38].

6.2.2. Cam fiber kumaş

Kullanılmış olan cam fiber kumaşları METYX firmasından tedarik edilmiş olup üç eksenli ancak örgü tipi olmayan kumaştır. Kumaşın ticari adı XT 907 olup X işareti $\pm 45^\circ$ yönlerini gösterirken T ise 90° fiber yönüne işaret etmektedir. Şekil 6.2 fiber yönlerinin diziliş şeklini görsel olarak sunmaktadır. Bu doğrultuda kumaş triaxial olup 3 yönde fiber dizilimine sahiptir. Kumaş ağırlığı 907 g/m^2 olup $+45^\circ$ ile -45° fiberlerin ağırlığı 300 g iken 90° fiberlerin ağırlığı 307 g 'dır.



Şekil 6.2: Kullanılmış olan cam fiber kumaşın fiber diziliminin gösterimi [39].

Kumaşlar üst üste 10 kat olarak dizilerek vakum infüzyon yönteminde kullanılmıştır. İlgili kumaş ebatları 40x40 cm'dir.

6.2.3. Nano kristalin elmas tozu

Kullanılmış olan nano boyutta kristalin elmas tozu, patlatma yöntemi ile sentezlenmiş olup ortalama tane boyutu 3 nm ve tane boyut aralığı 1-15nm'dir [17].

Bu çalışmada kullanılan nano kristalin elmas tozu İleri Teknoloji Malzemeleri Araştırma ve Geliştirme A. Ş. (Gebze) tarafından sağlanmıştır. Patlatma yöntemi ile sentezlenen aşırı dağılmış elmas için verilen model yapıda elmas öz, soğanimsi karbon kabuk ve nano boyutta grafit plakalar ile kaplıdır, en dışta ise grafit partiküller ve metal inkluzyonlar yer almaktadır. Elmasın reçine karışımına bağlanabilmesi bu dış kabuk ile mümkün olmaktadır [17].

6.2.4. %6'lık CoNap

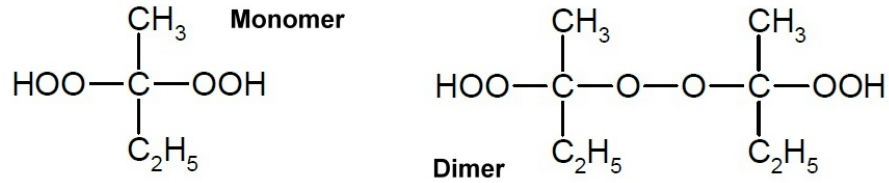
Ticari olarak %6'lık CoNap (kobalt naftanat) olarak anılan malzeme reaksiyon geliştirici (promoter) olarak yapıya katılmıştır.

Diğer ticari şekilleri ise %12 ve %21'lik olarak bulunmaktadır. Bu yüzde çözelti içerisindeki aktif kobalt miktarını göstermektedir. İlgili malzeme koyu renkli bir akışkandır. Farklı markalar reaksiyon reaktivliklerinde farklılıklar gösterebilmektedir [40].

6.2.5. MEKP

Katalizör olarak katılan MEKP, Akzo Nobel Butanox M-60 türüdür. MEKP genel açılımı metil etil keton peroksittir.

Ticari bilgileri doğrultusunda toplam aktif oksijen oranı %9.8 -10.0 arasında, peroksit içeriği %36 olup %60 DMP (dimethyl amino methyl phenol), %4 MEK ve sudur (Şekil 6.3'de kimyasal formülasyonu sunulmuştur) [41].



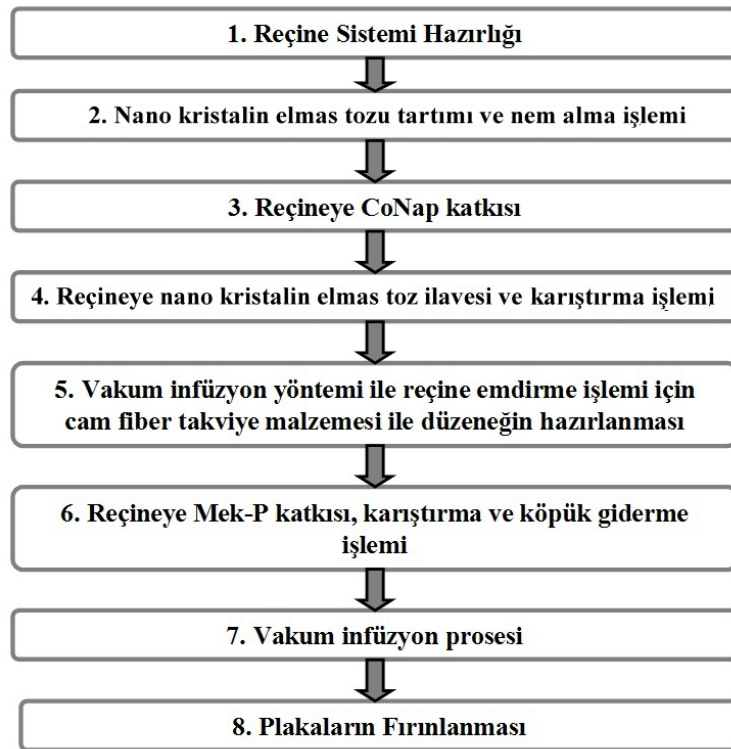
Şekil 6.3: MEKP kimyasal formülasyonu [42].

Fiziksel özelliklerinden 20°C'deki yoğunluğu 1170 kg/m³ ve viskozitesi 25 mPa.s'dır. Su içerisinde çözünmez. Temel ayrışma ürünleri karbondioksit, su, asetik asit, formik asit, propiyonik asit ve metil etil ketondur. Oda veya yükseltilmiş sıcaklıklarda kobalt varlığında doyamamış poliester reçine ile vinilester reçinelerin kür edilmesinde kullanılmaktadır. Takviye malzemesi ve yapısına (laminasyona), diğer yardımcı katkılara ve ortam sıcaklığına bağlı olarak jelleşme ile kür süresi değişmektedir [41].

Bu madde hem poliester hem de vinilester reçinelerde sertleştirici olarak kullanılmaktadır. Deneysel çalışmadaki sisteme % 2 oranında katılmıştır. Kullanım miktarı ağırlıklı olarak gerekli çalışma süresine, ortam sıcaklık ve nemine bağlı olmaktadır. Şeffaf ve renksiz bir akışkan olup kullanımı oldukça tehlikelidir [42].

6.3. Balistik Plaka Üretim Süreci

Deneysel çalışma sürecinde plaka üretimine ait üretim akışı Şekil 6.4’de özetlendiği şekilde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.4: Balistik plaka üretim akışı.

Hesaplamalar 4 adet 10 katlı (cam fiber takviye kumaşı katman sayısı) ve 40x40 cm boyutundaki plaka için yapılmıştır. Buna göre tek bir cam fiber kumaşın ağırlığı 907 g/m²’dir. Tartma işlemleri sırasında Santır hassas terazi kullanılmıştır.

$$1 \text{ adet } 10 \text{ katlı plaka (reçinesiz ağırlık): } 907 \cdot \frac{40 \cdot 40}{10^4} \cdot 10 = 1451,2 \text{ g} \quad (6.1)$$

$$\%40 \text{ oranında reçine ağırlığı: } \frac{1451,2 \cdot 40}{60} = 967,47 \text{ g} \quad (6.2)$$

$$\text{Takviye ve reçine toplam ağırlık:} \quad 1451,2 + 967,47 = 2418,67 \text{ g} \quad (6.3)$$

$$\%2 \text{ MEKP katkısı için :} \quad \frac{1500 \cdot 2}{100} = 30 \text{ g} \quad (6.4)$$

$$\%0.5 \text{ CoNap (\%6'lık) :} \quad \frac{1500 \cdot 0,5}{100} = 7,5 \text{ g} \quad (6.5)$$

$$\text{Toplam reçine karışım ağırlığı:} \quad 1500 + 30 + 7,5 = 1537 \text{ g} \quad (6.6)$$

%0.5 oranında karbon elmas toz ilavesi (%0,1; %0,2 ve %0,4) :

$$\frac{1500 \cdot 0,1}{100} = 1,5 \text{ g} \quad (6.7)$$

$$\frac{1500 \cdot 0,2}{100} = 3,0 \text{ g} \quad (6.8)$$

$$\frac{1500 \cdot 0,4}{100} = 6,0 \text{ g} \quad (6.9)$$

Fırında kurutma işlemi için 20 g karbon elmas toz tartılarak 1 saat için 125°C'de fırına verilmiştir. Tartılan miktar 68,7253 g (kap darası : 48,7253) ve fırında kurutma sonrası tartım 68,3905 g'dır. Kurutma sonrası buharlaştırılan nem miktarı 0.3348 g olup %0,5 nem alınmıştır.

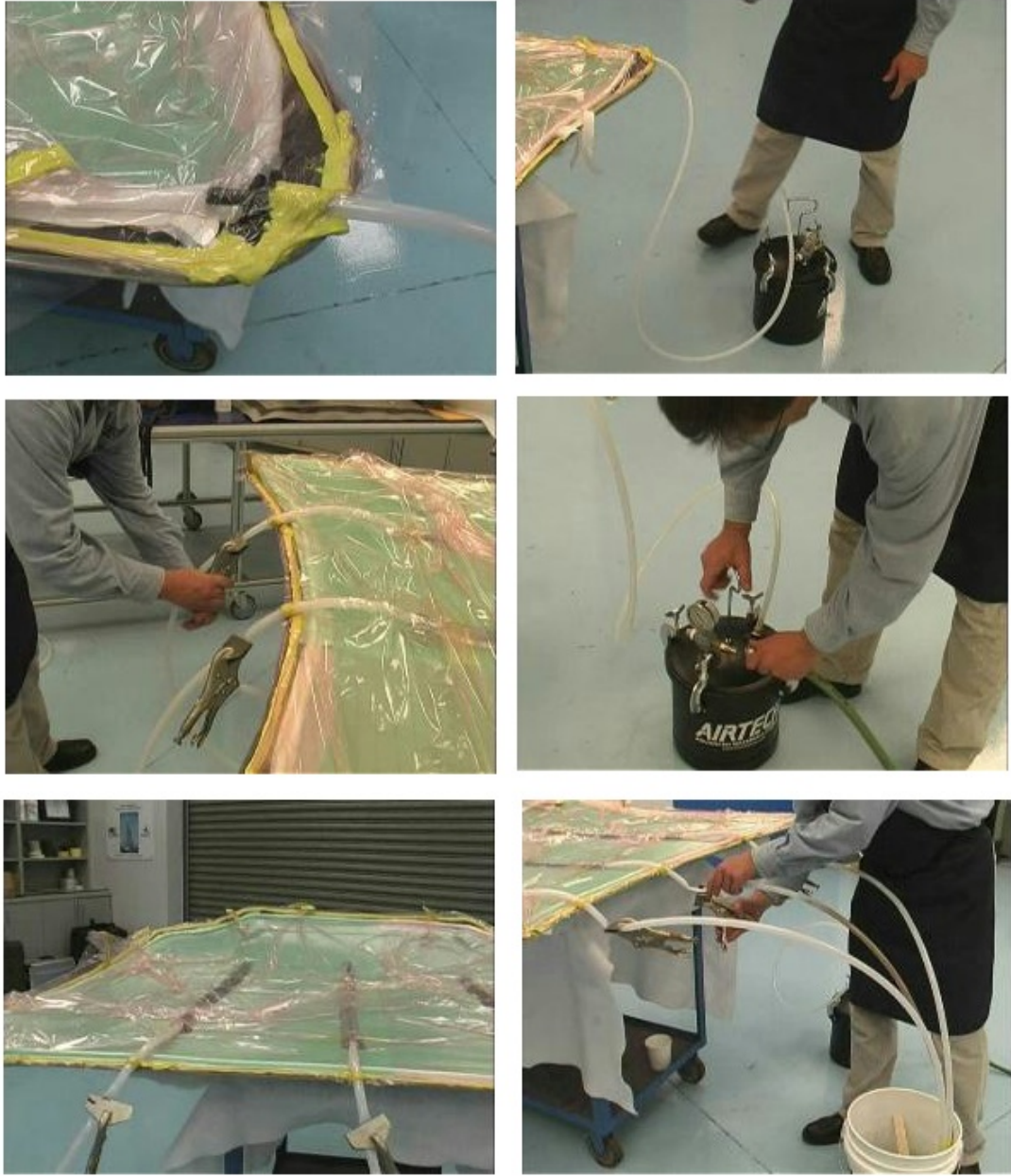
Kurutma işleminden sonra ilgili üç tartım gerçekleştirilmiş, toz malzeme küçük bir değirmende karıştırılarak disperse edilmiştir. Üç tartım da, daha öncesinde %0,5'lik CoNap ilavesi ile hazırlanmış olan reçine kaplarına boşaltılarak el mikseri ile reçine içerisine karışması sağlanmıştır.

Bu süre zarfında aşağıda tarif edildiği şekilde vakum infüzyon işlemi için 4 adet plaka ve gerekli çalışma masası hazırlanmıştır (Şekil 6.5 ve Şekil 6.6).



Şekil 6.5: Vakum infüzyon düzeneğinin hazırlanması (1) [43].

Dört reçine sistemine de son olarak %2 oranında MEKP katılarak Bosch mikser matkabı ile beşer dakika karıştırma gerçekleştirilmiş olup, oluşan köpüklenmeyi gidermek için ön vakum işlemi uygulanmıştır. Sırasıyla %0,1, %0,2 ve %0,4'lük reçineler vakum infüzyon sistemlerine bağlanarak işlem başlatılmıştır. Uygulanan vakum -600 mm Hg'dir. İşlem süresince kristalin toz oranının artması ile birlikte viskozitenin de arttığı ve böylece vakum infüzyonun (reçinenin sistem içersinde daha çok direnç ile karşılaşması sonucu yavaş ilerlemiştir) yavaşladığı ve zorlaştığı görülmüştür.



Şekil 6.6: Vakum infüzyon düzeneğinin hazırlanması (2) [43].

Kullanılan Vakum cihazı Zini marka olup 100 m² kapasiteli olan endüstriyel ölçekli bir vakum pompası ile çalışmaktadır.

Reçine besleme her dört plaka için de tüm yapılar ıslandıktan sonra kesilmiş olup vakumlama sürdürülmüştür. İlgili plakalar ekzotermik reaksiyon sonucu jelleşmiş olup kür edilmiştir. 24 saat sonrası plakalar düzeneklerden çıkarılarak postkür işlemi için 5 saat 110°C’de fırınlanmıştır.

6.4. Balistik Testler

Burada, balistik test süreci boyunca temel alınmış olan standartlara kısaca değinilerek balistik çalışma ile ilgilerine girilecektir (başlık 5.2 altında NIJ 0101.04'nun son revizyonu olan NIJ 0101.06 açıklanmıştır).

STANAG 2920 anlaşmasının kapsamı ve amacı, gövde zırhları, miğferler ve bunların üretiminde kullanılan malzemelerin balistik koruma sınırının BL(P) belirlenmesi için ana esasların standardize edilmesidir. Test sonuçları, çeşitli gövde koruma zırhlarından elde edilen balistik koruma derecesinin karşılaştırılmasına yardımcı olur [44].

Bu anlaşma, küçük silah çekirdekleriyle veya parça tesirli mermilerle yapılan deneyleri kapsamayı amaçlar. Burada, zırh malzemelerinin balistik koruyucu yeteneklerinin karşılaştırılmasına yardımcı olmak ve kayıp azaltma analizleri veya zırh dizaynı ve diğer hususları dikkate alan çeşitli eğitimlerdeki testler gibi, daha ayrıntılı ek teknikleri göz ardı etmemek amaçlanmıştır [44].

Test ekipmanı ve diğer malzemeler ile ilgili bilgiler aşağıda özetlenmiştir [44]:

1. Atılan cisim, zırhın koruma sağlaması istenen herhangi bir mermi olabilir, fakat parçalara karşı koruyan zırhlar için US MIL-P-46593'de tanımlanan veya parça tesirli mermi serilerinden biri olmalıdır. 5.385 mm kalibre, parça tesirli A3/6723/1 (1.102 g) mermilerin, zırh malzemelerinin genel değerlendirmesinde kullanılması tercih edilir. Mermi tabanı çevresindeki gaz paftası, mermi ile aynı kalibredeki yivli namludan atılması durumunda, parça tesirli mermi için tavsiye edilir.
2. Kullanılan sevk vasıtaları, mermiyi zırhın beklenen balistik sınır hızının her iki yanında 80 m/s aralığında bir hız ile fırlatmaya muktedir olmalı ve her deney için istenen hızdan ± 15 m/s'den fazla sapma olup olmadığı kontrol edilmelidir.
3. Mermiler normalde yivli bir namludan atılacaktır. Parça tesirli, bir sabot yardımıyla veya sabot yardımı olmadan yivli veya yivsiz namlulardan atılabilirler, ancak vuruş noktasındaki sapmalarının aşırı büyük olmaması gerekir.

4. Merminin hızı, uçuş sırasında en az 1 m mesafe üzerinde ölçülmek suretiyle bulunacaktır. İki kronograf içeren zaman ölçüm sistemi ve tespit perdeleri, tespit perdelerinin neden olduğu yavaşlatma etkileri ve havanın sürüklenme etkileri için düzeltmeler yapıldığında zırha çarpmadan hemen önce hesaplanan hız %1'e kadar doğru olacak şekilde olmalıdır.

5. Merminin üzerinde temiz bir delik açacağı sert malzemeden yapılmış teğet açısı kartları, merminin teğet açısının ölçülmesi için hedefin (deney paneli) hemen önünde kullanılacaktır. Teğet açısı ölçümü sadece, eğer teğetin var olduğunu gösteren kurşun profil izinin görünür bir inceleme imkanı varsa yapılır. Ölçüm, aşağıdaki tekniklerden biri kullanılarak yapılır:

- Fotografik, Ortogonal
- X - ışını, Ortogonal
- Kurşun teğet açısına karşılık teğet açısı kartı profili.

Eğer yukarıdaki ölçümlerden biri, teğet açısının 5°'den fazla olduğunu gösterirse, sistem kabul edilebilecek azami teğet açısı olan 5°'ye ulaşmak için değiştirilecektir (diğer bir deyişle, silah namlusu değiştirilecektir).

6. Zırh ve zırh malzemeleri, sert bir cisim üzerine öyle bir şekilde sıkı vidalanarak ve mengene ile sıkıştırılacak ki, mermi bunun sathına dik olan bir hat boyunca çarpacaktır. İskelet, deney bençine mekanik olarak tutturulacaktır. Vuruş noktasına 30 mm uzaklık dahilinde, zırhı arkadan destekleyen hiçbir şey bulunmayacaktır. Panel ölçüleri, farklı tip malzemeler için (kumaş, metal ve seramik maddeler) için mümkün olan azami genişlemeleri belirleyecek ve standardize edecek şekilde test edilecektir.

7. 0.5 mm inceliğinde alüminyum alaşımlı çuhaya (ISO/R209 minimum 440 N/mm² gerilim kuvvetine sahip Al-Cu4Mg alaşımı) veya öyle bir levhayı delmek için yeterli momentumu olan mermileri kayıt eden bir dedektör cihazına sahip bir tespit sistemi zırhın 15 cm arkasına yerleştirilir.

Aşağıdaki standart koşullar dokumalar için olan ISO koşullarıdır. Plastikler için olan ISO koşulları ise aynı değildir ($23 \pm 2^{\circ}\text{C}$, $50 \pm 5\% \text{RH}$). Dokuma ile ilgili koşullar, dokuma ürünlerinin çevreye karşı diğer malzemelere göre daha hassas olmaları nedeniyle sınırlandırılmıştır [44].

1. Teste tabi tutulacak zırh veya malzemeler testten önce test ortamında bekletilmelidir. Tavsiye edilen çevre koşulları ISO 554-1976'ye uygun olarak $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklık ve $\%65 \pm 5$ bağıl nem olacaktır. Eğer koşullar bundan farklı olursa bunun test raporuna kaydedilmesi gerekmektedir.

2. Zırha, en az altı adet mermi atışı yapılmalıdır ve bunların hızı ölçülmelidir. Zırh üzerinde tesirli darbeyi yapmayan mermiler, zırhın balistik sınır hızı hesaplaması sırasında göz ardı edilmelidir. Tesirli darbeyi yapan mermiler atış yolundan sapmayarak, normal ile 5° 'den fazla açı yapmadan test altındaki zırha veya malzemeye çarpan mermilerdir. Çarpma her hangi bir kat, destek noktası, kenar, daha önceki bir çarpma noktası, deformasyon veya malzemelerin hasarlanmış kısımlarından en az 30 mm uzakta gerçekleşmelidir. Buna ek olarak dokuma malzemelerinin testi süresince, aynı bükülmüş ipliğin üzerine birden fazla darbe gelmemelidir. Kaskların ve diğer yuvarlak yüzeylerin üzerine yapılacak darbelerin yerleri önceden belirlenmelidir. Test sonuçları kask üzerindeki baskı alanlarının etkilenip etkilenmediğini göstermelidir.

3. Hedefin içerisinden geçen veya hedefin arkasındaki malzemenin saçılmasına yol açan ve tespit sistemini aktive eden/edilen herhangi bir mermi içeriye tamamen nüfuz etmiş sayılır. Diğer tüm darbeler kısmi nüfuz olarak tanımlanır.

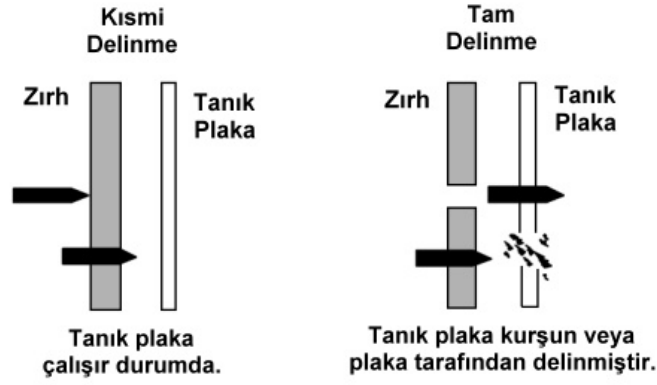
4. Bir malzeme veya zırh için V_{50} balistik sınır hızı, seçilen bir mermi için nüfuz etme olasılığının 0.5 olduğu hızdır. İlk turda aşağı ve yukarı ateş etme metodu kullanılarak, mermiye tahmini V_{50} balistik limit hızına eş hız verecek hesaplanmış sevk barutu miktarı doldurulur. Eğer ilk turda yapılan atışlarda tam nüfuz sağlanırsa, ikinci turda mermi hızını 30 m/s düşürecek şekilde hesaplanmış sevk barutu miktarı ile atış yapılır. Eğer ilk turda yapılan atışlarda kısmi nüfuz sağlanırsa, ikinci turda mermi hızını 30 m/s artıracak şekilde hesaplanmış sevk barutu miktarı ile atış yapılır. Atışlar, aşağıdaki prosedürlere uygun olarak V_{50} BL(P) tahmini elde edilinceye kadar sürdürülür.

- Belli sayıda mermi atıldıktan sonra, tesirli darbeyi sağlayan ve hızları kaydedilmiş atışlardan, kısmi nüfuza yol açan en yüksek üç atış hızı ile tam nüfuza yol açan en düşük üç atış hızının, en yüksek ve en düşük hızlarının farkı 40 m/s'lik bir aralık içinde kalması koşuluyla, ortalamaları alınarak V_{50} hızı hesaplanır.
- Eğer yukarıdaki alt paragraf taki sonuçlar, en yüksek tesirli darbe hızı ile en düşük kısmi darbe hızı arasındaki fark 40 m/s'yi aşması nedeniyle ulaşılabilir değilse, atışlar en yüksek beş kısmi nüfuz hızı ile en düşük beş tam nüfuza yola açan atış hızı arasındaki fark 50 m/s oluncaya kadar devam eder. V_{50} hızı da bu on hızın ortalaması alınarak hesaplanır.
- Eğer en yüksek tesirli darbe hızı ile en düşük kısmi darbe hızı arasındaki fark 50 m/s'yi aşarsa, en yüksek yedi kısmi nüfuz hızı ile en düşük yedi tam nüfuza yola açan atış hızları 60 m/s bir aralıkta kalan grup, hesaplamada kullanılmalıdır.
- Eğer en yüksek tesirli darbe hızı ile en düşük kısmi darbe hızı arasındaki fark 60 m/s'yi aşarsa, test malzemenin yeni bir örneğiyle tekrarlanmalıdır.

Malzemelerin balistik karakteristiklerini ölçmek için yaygın olarak kullanılan iki test mevcuttur. Delme derinliği (DOP/depth of penetration) yaklaşık olarak 1980'lerin ortasından bu yana geniş ölçüde seramik malzemelerin araştırılmasında kullanılmıştır. V_{50} balistik koruma limiti (PBL/protection ballistic limit) ise tüm malzemelerin incelenmesinde tahmin testi olarak kullanım görmektedir [45].

V_{50} PBL testi düşük ağırlıklı zırh malzemelerin balistik performansları açısından değerlendirilmesinde en yaygın kullanılan methodur. Bu doğrultuda bir zırh plakası arkasına yerleştirilen bir “tanık plakasının” son durumu Şekil 6.7’de gösterilmiş olduğu gibi, bir balistik testin deneysel sonuçlarını belirler. Balistik test sonucunda iki durum meydana gelebilmektedir [45]:

- Tam delinme (“tanık plakası” içerisinden görülen ışık ile ispatlanmaktadır), “tanık plakası” kurşun veya plaka tarafından tamamen delindiğinde meydana gelmektedir.
- Kısmi delinme, “tanık plakasında” herhangi bir delinme gözlenmediğinde (hatta test paneli delinmiş olsa dahi) meydana gelmektedir.



Sekil 6.7: Kısmi ve tam delinmeye ait şematik açıklama [45].

V_{50} PBL değeri MIL-STD-662F’de aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır [45]:

“ V_{50} BLP değeri belirli bir hız aralığı içerisinde bulunan, eşit sayıda en yüksek kısmi delinme hızları ile en düşük tam delinme hızlarına ait ortalama olarak tanımlanabilmektedir. Bir 0.51 mm kalınlığında 2024-T3 Alüminyum plakası, tam delinmeye tanıklık etmek üzere, hedefe paralel ve 152 ± 12.7 mm arkasına yerleştirilir. Normal olarak bir BLP testini tamamlamak için en az iki kısmi ve iki tam delinme hızı kullanılmaktadır. Dört, altı ve on’lu balistik limit belirlemeleri sıkça tercih edilmektedir. İzin verilebilir maksimum hız aralığı zırh malzemesi ile test koşullarına bağlıdır. 18, 27, 30 ve 38 m/s’lık maksimum hız aralıkları yaygın olarak kullanılmaktadır.”

6.5. Deneysel Çalışma Sonucu

Kara Kuvvetleri Komutanlığı 8’inci Ana Bakım Merkezi Komutanlığı Afyonkarahisar tesisinde düzenlenmiş olan atış denemeleri aşağıda sıralanmış olan standartlar kapsamında gerçekleştirilmiştir:

- STANAG 2920 (balistik laboratuvar)
- NIJ 0101.04
- MIL 662F (V_{50})

Balistik test öncesi test plakaları kalınlık, en, boy ve ağırlık bilgileri açısından değerlendirilmiş olup Tablo 6.3’de özetlenmiştir.

Tablo 6.3: Test plakaların ölçü ve ağırlık açısından değerlendirilmesi.

| Plaka | Kalınlık (mm) | En x Boy (cm x cm) | Ağırlık (kg) |
|-------|---------------|--------------------|--------------|
| 0 | 6.3 | 40 x 40 | 1.93 |
| 0.1 | 6.5 | 40 x 40 | 1.94 |
| 0.2 | 6.5 | 40 x 40 | 1.97 |
| 0.4 | 6.4 | 40 x 40 | 1.97 |

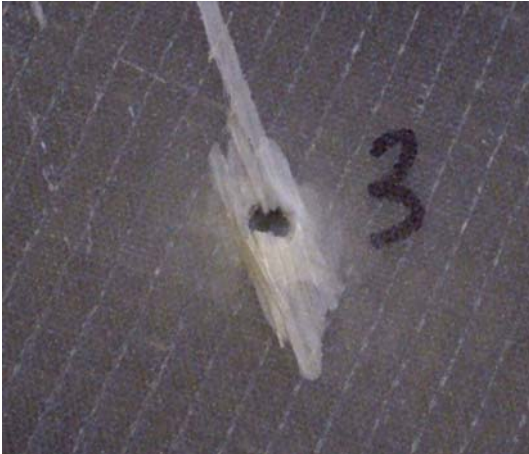
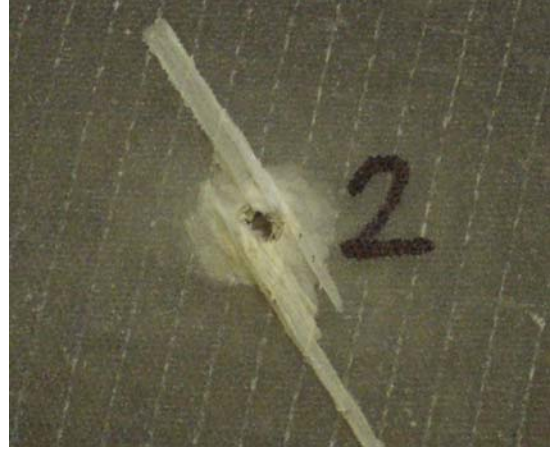
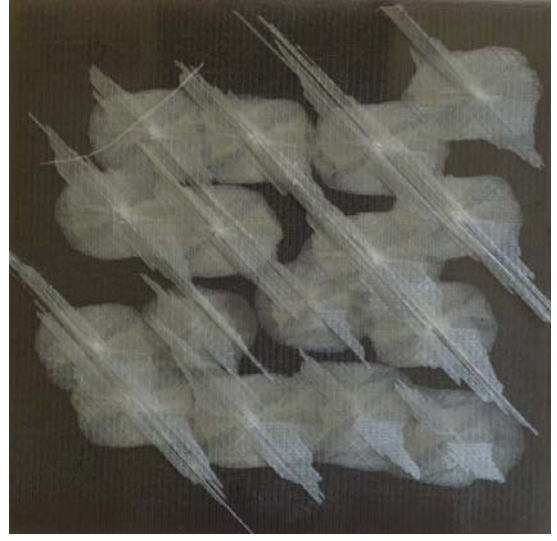
Balistik testin gerçekleştirildiği koşullar aşağıda özetlenmiştir:

- Fragment (parçacık) 1.1 gr ağırlık (STANAG 2920'de tanımlıdır);
- Şahit Alüminyum plaka test edilen plakanın 15 cm arkasında yerleştirilmiştir;
- Atışlar 0° 'de yapılmıştır;
- Atış mesafesi 5 metre olup plakaya yapılan atışlar arasında minimum 5 cm mevcuttur;
- Plakalar $22 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 'de 24 saat olarak şartlandırılmıştır.

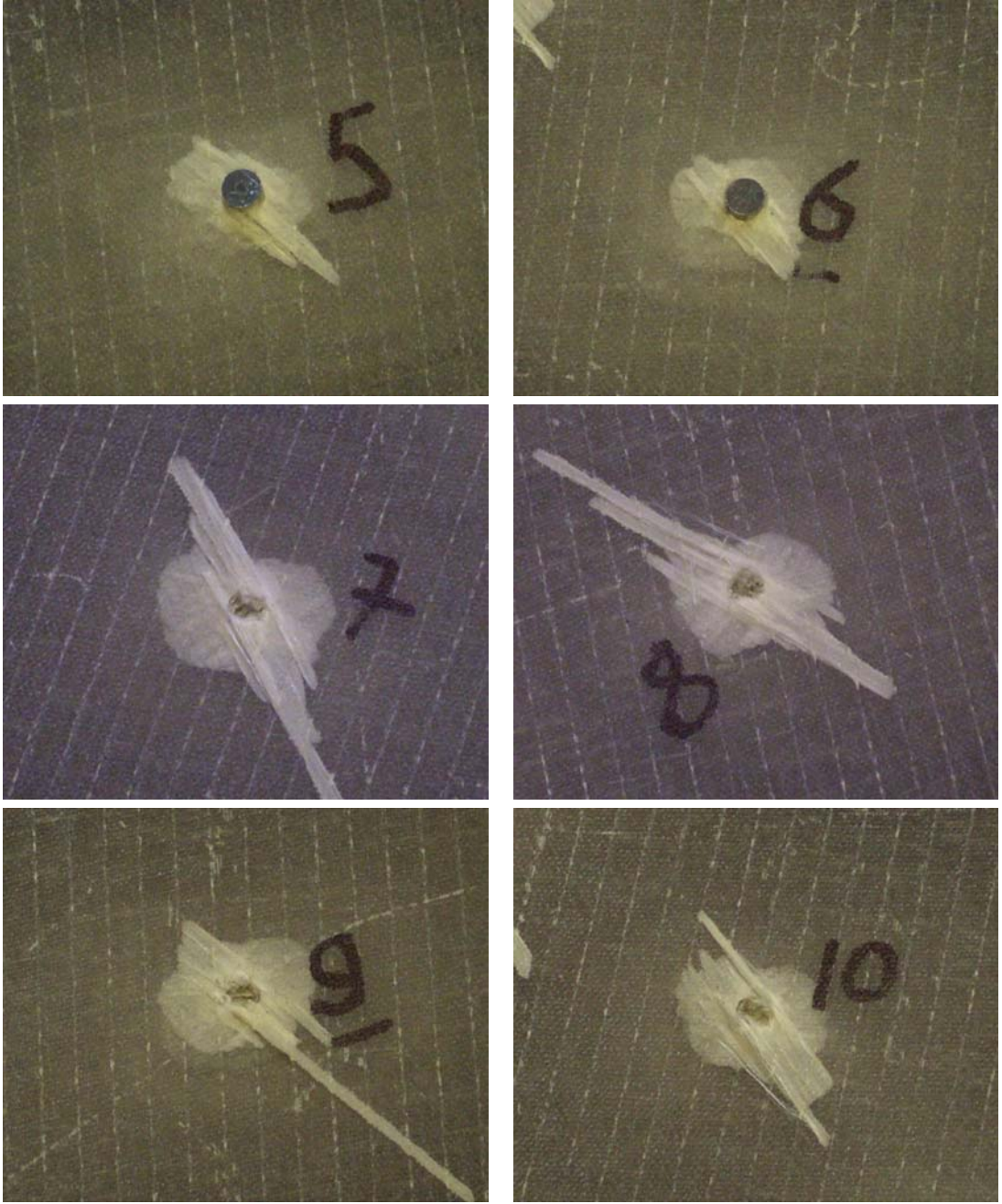
Yukarıdaki koşullar altında, nano boyutta elmas toz katkısı olmayan plakaya uygulanmış olan balistik testin sonuçları Tablo 6.4'de ve ilgili atışların görüntüleri Şekil 6.8 ile 6.10 arasında sunulmuştur.

Tablo 6.4: Balistik test sonuçları (nano elmas toz katkısı bulunmayan plaka).

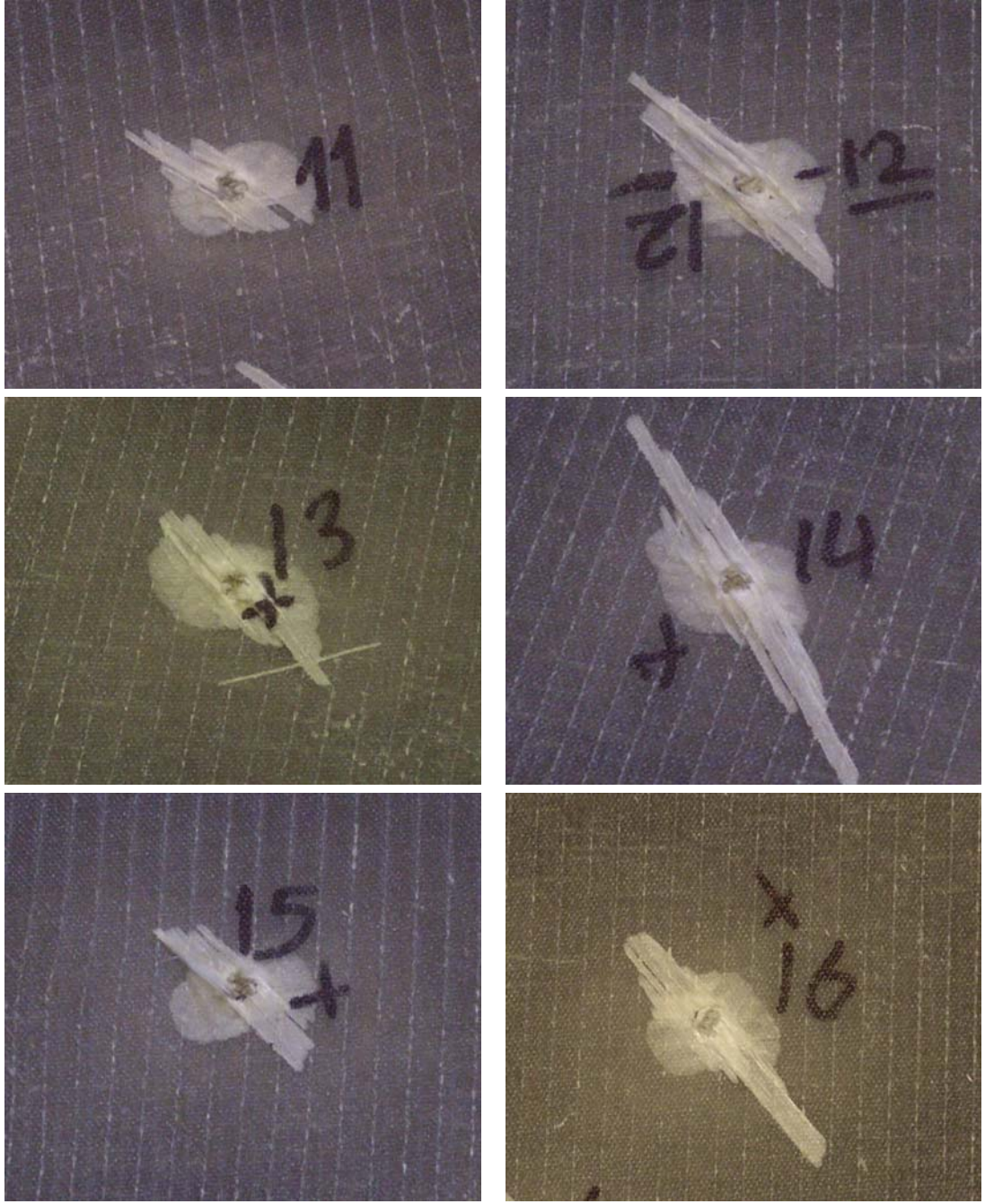
| Atış No. | Hız (m/s) | Sonuç (Delinme) |
|----------|-----------|---------------------------------|
| 1 | 493 | var |
| 2 | 418 | yok |
| 3 | 415 | yok |
| 4 | 634 | var |
| 5 | 360 | yok |
| 6 | 359 | yok |
| 7 | 506 | var |
| 8 | 505 | var |
| 9 | 422 | yok |
| 10 | 477 | var |
| 11 | 440 | Kısmi delinme (Al plaka sağlam) |
| 12 | 493 | var |
| 13 | 486 | var |
| 14 | 540 | var |
| 15 | 446 | Kısmi delinme (Al plaka sağlam) |
| 16 | 455 | var |



Şekil 6.8: Nano boyutta elmas toz katkısı bulunmayan plakaya ait 16 atış sonrası ön ve arka görüntüleri ile 1 numaralı atıştan 4 numaralı atışlar arası plaka görüntüleri.



Şekil 6.9: Nano boyutta elmas toz katkısı bulunmayan plakaya ait 16 atış sonrası 5 numaralı atıştan 10 numaralı atışlar arası plaka görüntüleri.

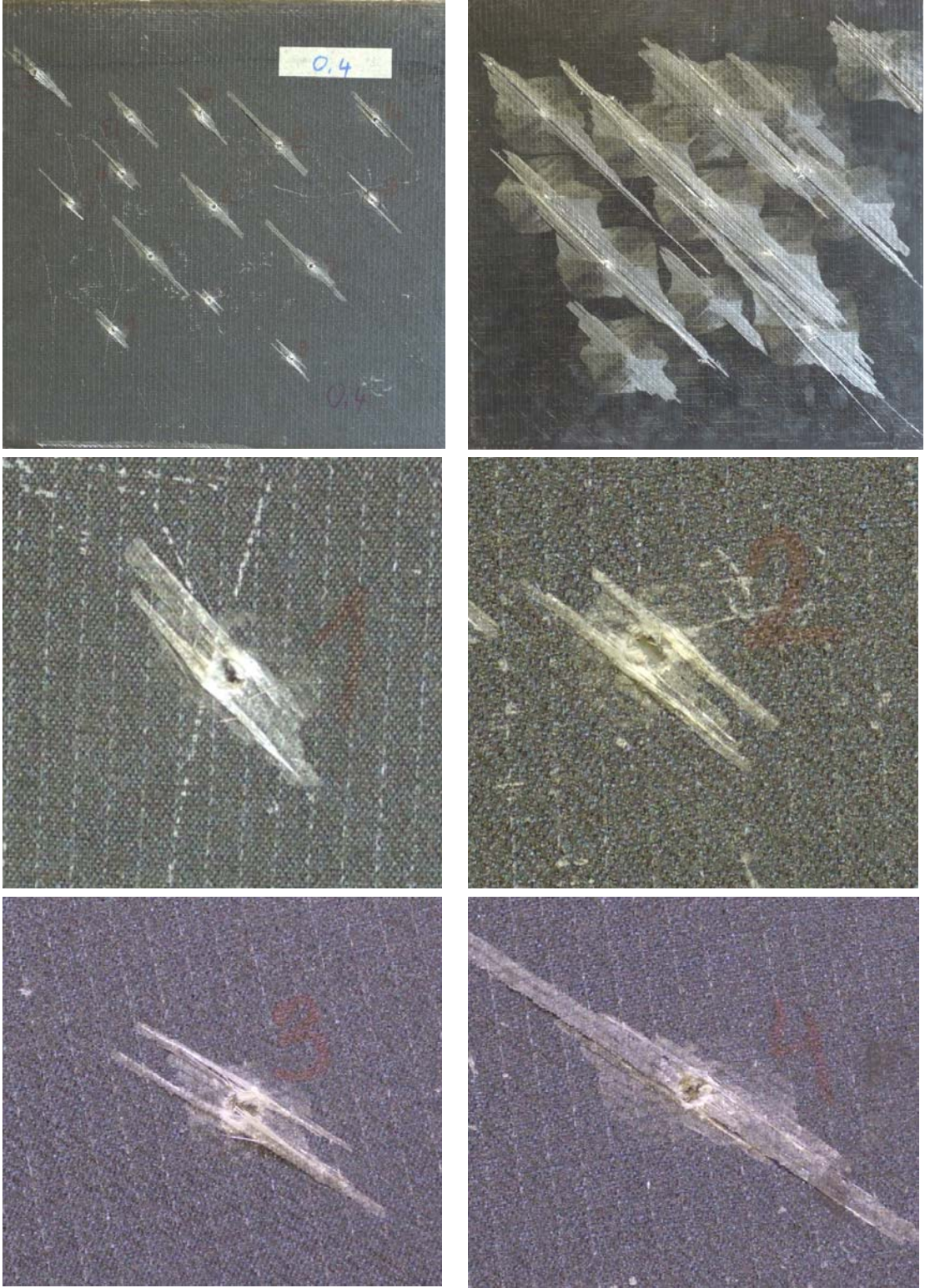


Şekil 6.10: Nano boyutta elmas toz katkısı bulunmayan plakaya ait 16 atış sonrası 11 numaralı atıştan 16 numaralı atışlar arası plaka görüntüleri.

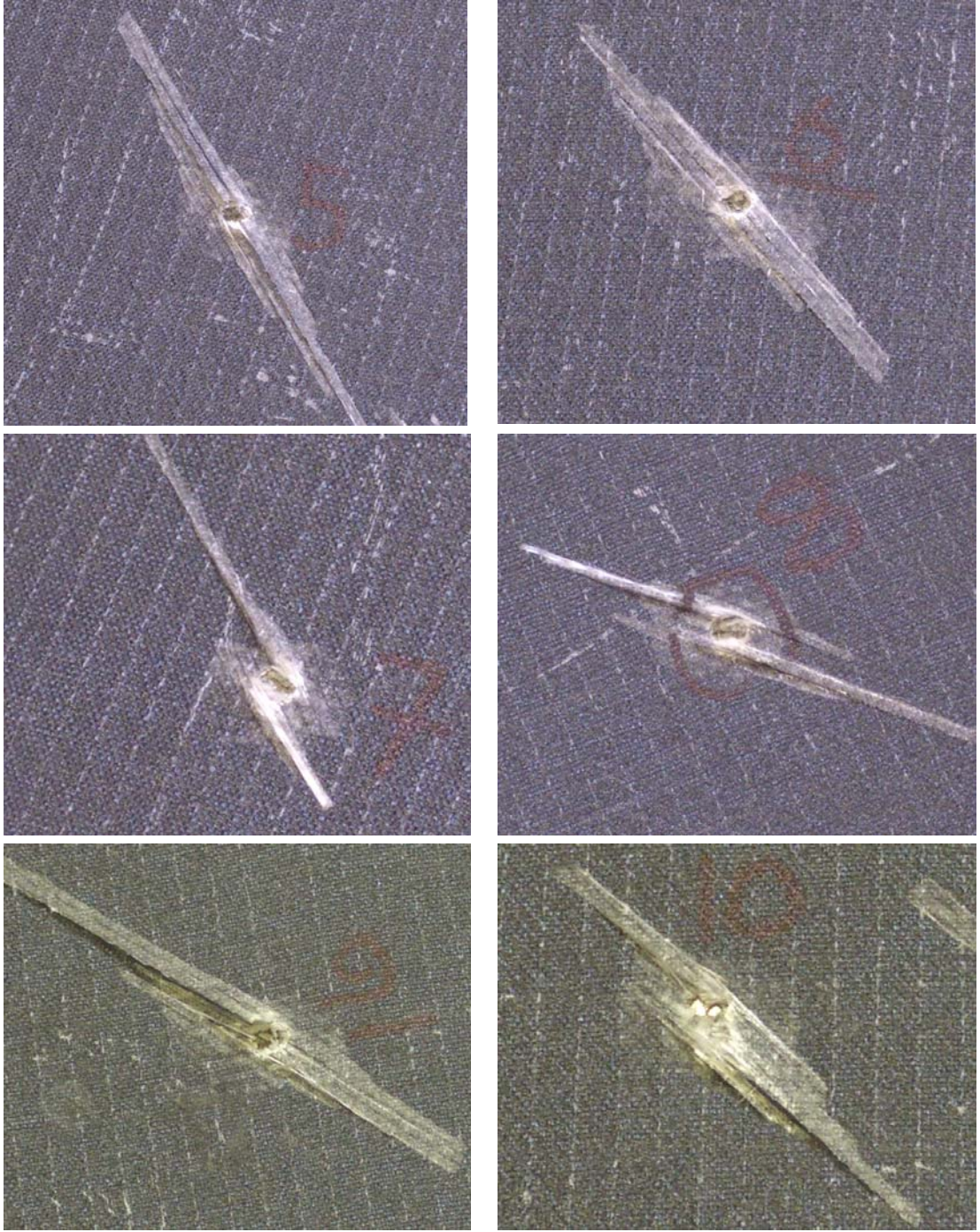
Tablo 6.5: Balistik test sonuçları (%0.4 nano elmas toz katkıli plaka).

| Atış No. | Hız (m/s) | Sonuç (Delinme) |
|-----------------|------------------|---------------------------------|
| 1 | 513 | Var |
| 2 | 423 | Yok |
| 3 | 431 | Yok |
| 4 | 591 | Var |
| 5 | 544 | Var |
| 6 | 450 | Var |
| 7 | 401 | Yok |
| 8 | 424 | Yok |
| 9 | 521 | Var |
| 10 | 405 | Yok |
| 11 | 464 | Var |
| 12 | 562 | Var |
| 13 | 429 | Yok |
| 14 | 447 | Kısmi delinme (Al plaka sağlam) |

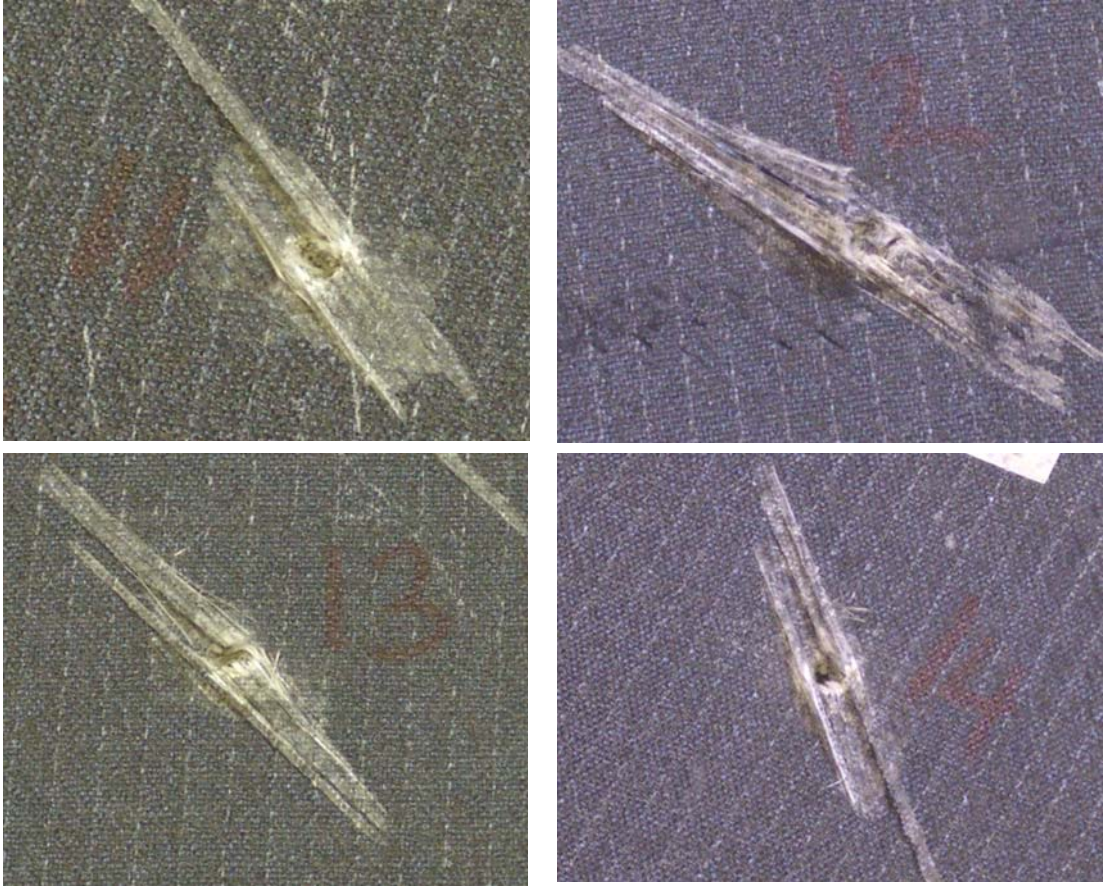
%0.4 nano boyutta elmas toz katkısı olan plakaya uygulanmış olan balistik testin sonuçları Tablo 6.5’de ve ilgili atışların görüntüleri Şekil 6.11 ile 6.13 arasında sunulmuştur.



Şekil 6.11: %0.4 nano boyutta elmas toz katkılı plakaya ait 14 atış sonrası plaka ön ve arka yüzeylerine ait görüntüler ile 1 numaralı atıştan 4 numaralı atışlar arası plaka görüntüleri.



Şekil 6.12: %0.4 nano boyutta elmas toz katkılı plakaya ait 14 atış sonrası 5 numaralı atıştan 10 numaralı atışlar arası plaka görüntüleri.



Şekil 6.13: %0.4 nano boyutta elmas toz katkılı plakaya ait 14 atış sonrası 11 numaralı atıştan 14 numaralı atışlar arası plaka görüntüleri.

Balistik testler sonucunda, V_{50} değerlerini bulmaya yönelik aşağıdaki hesaplamalar gerçekleştirilmiş olup sonuçları sunulmuştur. 6.10 numaralı sonuç nano boyutta elmas toz katısı bulunmayan plakaya aitken, 6.11 numaralı sonuç %0.4 nano boyutta elmas toz katkılı plakaya aittir.

$$V_{50} = (415 + 418 + 422 + 440 + 446 + 455) / 6 = 2596 / 6 = 432.7 \text{ m/s} \quad (6.10)$$

$$V_{50} = (424 + 429 + 431 + 447 + 450 + 464) / 6 = 2645 / 6 = 440.8 \text{ m/s} \quad (6.11)$$

Standart gereği ortalamaya giren en yüksek ve en düşük değerler arasında 40 m/s fark olmalıdır.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, fiber takviyeli polimer matrisli kompozitlerin özellikle balistik uygulamalardaki performansı, teorik olduğu kadar deneysel çalışmaların eşliğinde incelenerek, sonuç olarak günümüz balistik uygulamalarına yönelik ihtiyaç duyulan malzeme özelliklerine uygunluğu incelenmiştir.

Bu amaç doğrultusunda cam fiber ve nano kristalin elmas toz takviye malzemesi ile matris malzemesi olarak bir termoset polimer olan vinilester reçine seçilerek, bunların vakum infüzyon yöntemiyle üretimi ele alınmıştır.

Bu girdilerin ayrı ayrı malzeme özellikleri incelenerek, ortak kullanımları ile oluşturulmuş olan kompozit malzemenin balistik deneyi gerçekleştirilmiş ve deneysel sonuçları irdelenmiştir.

Bu bilgiler ışığında gerçekleştirilmiş olan deneysel çalışmaların sonuçları değerlendirilmiş ve balistik uygunluk test edilmiştir.

V_{50} değerlerin kıyaslanması sonucunda %0.4'lük gibi çok düşük miktarda nano elmas toz katkısının balistik limiti arttırdığı görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] Lane, R. A., High performance fiber for personel and vehicle armor systems”, *Amptiac*, 2, 3 (2005).
- [2] Bader, M. G., “Polymer composites in 2000: structure, performance, cost and compromise”, *J. of Microscopy*, 201, 112, (2000).
- [3] Chang, K. K., “ASM Handbook: Composites-Aramid Fibers”, 21, *ASM International*, 107, (2001).
- [4] 2009, *Reinforcing Fibres & Finishes [online]*, Gurit (UK) Ltd, http://www.gurit.com/core/core_picker/download.asp?documenttable=libraryfiles&id=449 (**Ziyaret tarihi: 27 Mart 2009**).
- [5] 2003, John Wiley & Sons, Inc., Encyclopedia of Polymer Science and Technology, [http://www.weizmann.ac.il/wagner/COURSES/Reading%20material%200\(papers\)/Encyclopedy_of_polymer_science_2003.pdf](http://www.weizmann.ac.il/wagner/COURSES/Reading%20material%200(papers)/Encyclopedy_of_polymer_science_2003.pdf) (**Ziyaret tarihi: 27 Mart 2009**).
- [6] Clements, L. L., “Handbook of Composites-Organik Fibers”, Second edition, *Kluwer Academic Publishers*, 202-207, (1998).
- [7] DuPont, 2008, Technical Guide: Kevlar – Aramid Fiber [online], *U.S.A.*, <http://personalprotection.dupont.ca/literature.html> (**Ziyaret Tarihi: 20. Ekim 2008**).
- [8] Gardner, D. J., 2002, *Aramid Fibers* [online], University of Maine, <http://www.umaine.edu/adhesion/gardner/5502002/wood-frp%20manufacturing.pdf> (**Ziyaret Tarihi: 20 Ekim 2008**).
- [9] Chawla, K. K., “Composite Materials: Science and Engineering”, Second Edition, *Springer*, 43, (1998).
- [10] 2008, Aramid – Production [online], http://www.experiencefestival.com/aramid_-_production (**Ziyaret Tarihi: 20. Ekim 2008**).
- [11] Core Composites, 2008, Aramid Fiber [online], *Newport*, <http://www.corecomposites.com/media/aboutKevlar.pdf> (**Ziyaret Tarihi: 27. Aralık 2008**).
- [12] Department of Defence, “Military Handbook – Plastic matrix composites with continuous fiber reinforcement”, *AMSC NIA*, 50-54 , (1991).
- [13] Rosato, D., 2004, *Reinforced Plastics – Handbook* [online], Elsevier Science & Technology Books, <http://books.google.com/books?id=AND6HhssvcC&printsec=>

frontcover&dq=%22Reinforced+Plastics+Handbook%22#PPR3,M1 (**Ziyaret tarihi: 27 Mart 2009**).

[14] 2009, *Technische Daten für Glasfasergewebe* [online], LCS Laboratory Consulting Service GmbH, <http://www.labconservice.de/downloads/Datenblatt%20E-Glas.pdf> (**Ziyaret tarihi: 27 Mart 2009**).

[15] 2009, *E-Glass Fibre* [online], AZOM, <http://www.azom.com/details.asp?ArticleID=764> (**Ziyaret tarihi: 27 Mart 2009**).

[16] SP Systems, 2003, *SP Systems Guide to Composites* [online], *İtalya*, http://www.antonio.licciulli.unile.it/Corso_Ceramici/relazioni/materiali%20compositi.pdf (Ziyaret Tarihi: 20. Ekim 2008).

[17] Polat, Ş., Karagöz, Ş., “Lastik Teknolojisinde Elmas Kristalin Dolgu Malzemesi Kullanımı”, KOÜ BAPB-Proje No. 2003-059 Sonuç Raporu, (2003).

[18] Danilenko, V., “On the History of the Discovery of Nanodiamond Synthesis”, *Physics of the Solid State*, 46, 595-599, (2004).

[19] Fenglei, H., Yi, T., Shourong, Y., “Synthesis Mechanism and Technology of Ultrafine Diamond from Detonation”, *Physics of the Solid State*, 46, 616-619, (2004).

[20] Peng, J., Bulcock, S., Belobrov, P., Bursill, L., “Surface Bonding States of Nano-Crystalline Diamond Balls”, *International Journal of Modern Physics B*, 15, 4071-485, (2001).

[21] Bursill, L., Fullerton, A., Bourgeois, L., “Size and Surface Structure of Diamond Nano-Crystals”, *International Journal of Modern Physics B*, 15, 4087-4102, (2001).

[22] 1998, Goodman, S., *Handbook of Thermoset Plastics* [online], Noyes Publications, <http://ebooks.blogcu.com/page3> (**Ziyaret tarihi: 27 Mart 2009**).

[23] 2009, *Fiberglass* [online], Wikipedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Fiberglass> (**Ziyaret tarihi: 27 Mart 2009**).

[24] 2005, *Composites* [online], Polymer Science Learning Center, University of Southern Mississippi, <http://pslc.ws/macrogcss/composit.html> (**Ziyaret tarihi: 27 Mart 2009**).

[25] “Technology update: vacuum infusion”, *Reinforced Plastics*, 48, 28-29, (2004).

[26] Fibre Glast, 2008, *Ohio*, Vacuum Infusion – The Equipment and Process of Resin Infusion [online], <http://www.fibreglast.com/documents/361.pdf> (**Ziyaret Tarihi: 20. Ekim 2008**).

[27] SCRIMP Technology, 2001, An Overview of the SCRIMP Technology [online], *MIT Open Courseware*, <http://ocw.mit.edu/NR/rdonlyres/Ocean-Engineering/13->

734Fall2003/195122BD-31AB-4D25-88D8DB54CBB3DC0D/0/scrimp_overview.pdf (Ziyaret Tarihi: 20. Ekim 2008).

[28] Hammami, A., “Effect of reinforcement structure on behavior in the vacuum infusion compaction process”, *Polymer Composites*, 22, 337, (2001).

[29] Hammami, A., Gebart, B. R., “Analysis of the vacuum infusion moulding process”, *Polymer Composites*, 21, 28-35, (2000).

[30] Performance Composites, 2008, Resin vacuum infusion [online], *Compton*, http://www.performancecomposites.com/newsletter_2.html (Ziyaret Tarihi: 20. Ekim 2008).

[31] Summerscales, J., Searle, T., “Low-pressure (vacuum infusion) techniques for moulding large composite structures”, *J. Materials Design and Applications*, 219, 50, (2004).

[32] Kleinberg, M., Herbeck, L., Schöppinger, C., 2002, Advanced liquid resin infusion – a new perspective for space structures [online], *Braunschweig*, http://www.dlr.de/fa/Portaldata/17/Resources/dokumente/publikationen/2002/13_kleinberg.pdf (Ziyaret Tarihi: 20. Ekim 2008).

[33] 2002, Protective equipment and body armour [online], *AZOM*, <http://www.azom.com/details.asp?ArticleID=1663> (Ziyaret Tarihi: 20. Ekim 2008).

[34] 2008, *Ballistic Resistance of Body Armor NIJ Standard-0101.06* [online], National Institute of Standards and Technology, <http://www.ncjrs.gov/pdffiles1/nij/223054.pdf> (Ziyaret tarihi: 20 Ekim 2008).

[35] 2009, *Full metal jacket bullet* [online], Wikipedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Full_metal_jacket_bullet (Ziyaret tarihi: 27 Mart 2009).

[36] 2009, *FMJ – standart hardball bullet* [online], <http://world.guns.ru/ammo/bullets-e.htm#fmj> (Ziyaret tarihi: 27 Mart 2009).

[37] Carboni, M., 2004, *Evaluation of Ballistic Materials for Back Protection Under Low Velocity Impacts* [online], Worcester Polytechnic Institute, <http://www.wpi.edu/Pubs/ETD/Available/etd-0430104-131552/unrestricted/mcarboni.pdf> (Ziyaret tarihi: 20 Ekim 2008).

[38] “PV-300 Epoksi Vinilester Reçine-Teknik Bülten”, *İlkalem Ticaret ve Sanayi A.Ş.*, (2008).

[39] 2009, *Teknik Bülten* [online], METYX Telateks A. S., <http://www.metyx.com> (Ziyaret tarihi: 27 Mart 2009).

[40] 2009, *Section 1 – Selecting reinforcements, catalysts and cure - control additives* [online], <http://pdf.directindustry.com/pdf/ashland-composite-polymers/derakane-fabricating-tips-41094-29763.html> (Ziyaret tarihi: 27 Mart 2009).

[41] 2009, *Peroxides for Thermoset Resins – Butanox M-50* [online], Akzo Nobel, <http://www.chemi-pro.com/pdf/butanoxm-50.pdf> (**Ziyaret tarihi: 27 Mart 2009**).

[42] 2009, *Resins & MEKP* [online], ebay.com.au, http://reviews.ebay.com.au/Resins-amp-MEKP_W0QQugidZ10000000010322068 (**Ziyaret tarihi: 27 Mart 2009**).

[43] 2009, *Adım Adım İnfüzyon Uygulaması* [online], Uygulama Teknik Bülten, Poliya Poliester ve Yard. Mad. San., <http://www.poliya.com.tr/documents/catalogs/Poliya%20Infusion.pdf> (**Ziyaret tarihi: 27 Mart 2009**).

[44] Ferrari, G., “Personel Zırhları için Balistik Test Metodu”, *Kuzey Atlantik Anlaşması Organizasyonu (NATO)*, STANAG-2920, (1996).

[45] Craig, B., Lane, R., Babcock, W., “Blast and Penetration Resistant Materials”, Second Edition, *AMPTIAC*, 8, (2001).

ÖZGEÇMİŞ

1980 yılında Bad Neustadt/Almanya’da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Almanya’da ve lise öğrenimini Kocaeli/Türkiye’de tamamladı. 2001 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünü 2005 yılında tamamladı. 2005-2007 yılları arasında, Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü’nde Araştırma Asistanı olarak görev yaptıktan sonra, 2008 yılından beri Teklas Kauçuk A.Ş.’de Kalite Güvence Mühendisi olarak çalışmaktadır.