ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yüce Onur BİLİR

TEKSTİL TAKVİYELİ KOMPOZİTLERİN BALİSTİK AMAÇLI KULLANIM PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI

TEKSTİL MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ADANA, 2021

ÖZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEKSTİL TAKVİYELİ KOMPOZİTLERİN BALİSTİK AMAÇLI KULLANIM PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI

Yüce Onur BİLİR

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEKSTİL MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Danışman **:** Prof. Dr. Emel Ceyhun SABIR
Yıl**:** 2021, Sayfa: 213
Jüri **:** Prof. Dr. Emel Ceyhun SABIR
: Prof. Dr. Belkıs ZERVENT ÜNAL
: Dr. Öğr. Üyesi Çiğdem SARPKAYA

Bu tez çalışmasında, balistik malzeme üretiminde tekstil takviyeli kompozitler araştırılmış ve performansları ortaya konulmaya çalışılmıştır. Tezde balistikle ilgili koruyuculuk seviyelerine yönelik bilgiler verilmiş, tekstil takviyeleri lif ve kumaş olarak ayrı ayrı incelenmiş, daha sonra tekstil takviyeli balistik kompozitlerle ilgili güncel yapılmış çalışmalar özellikle performansları ele alınarak verilmeye çalışılmıştır. Çalışmalarda özellikle Kevlar kumaş takviyelerin kompozit balistik üretiminde farklı katmanlar halinde kullanıldığı görülmüştür. Kumaş yapısı olarak bezayağı kumaş yapısının daha yüksek performans verdiği, en az 20 kat kumaş yapısının kullanılmasının etkili bir balistik performans gösterdiği görülmüştür. UHMWPE lif demetlerinin takviye olarak lif (filament iplik) olarak en iyi performanslı malzeme olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Balistik, Kompozit, Kumaş, Balistik lif, Balistik Performans

ABSTRACT

MSc THESIS

INVESTIGATION OF THE USE OF BALLISTIC PURPOSE PERFORMANCE OF TEXTILE REINFORCED COMPOSITES

Yüce Onur BİLİR

ÇUKUROVA UNIVERSITY
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
DEPARTMENT OF TEXTİLE ENGINEERING

Supervisor **:** Prof. Dr. Emel Ceyhun SABIR
Year: 2021, Page: 213
Jury **:** Prof. Dr. Emel Ceyhun SABIR
: Prof. Dr. Belkıs ZERVENT ÜNAL
: Dr. Öğr. Üyesi. Çiğdem SARPKAYA

In this thesis, textile reinforced composites were investigated in ballistic material production and their performance was tried to be revealed. In the thesis, information was given about the protection levels related to ballistics, textile reinforcements were examined separately as fiber and fabric, and then current studies on textile reinforced ballistic composites were tried to be given by considering their peformance. In the studies, it was seen that especially Kevlar fabric reinforcements were used in different layers in composite ballistics production. It has been observed that the plain fabric structure gives higher performance as the fabric structure, and the use of at least 20 layers of fabric structure has an effective ballistic performance It has been observed that UHMWPE fiber bundles are the best performance material as fiber (filament yarn) as reinforcement.

Key Words: Ballistic, Composite, Fabric, Ballistic fiber, Ballistic Performance

GENİŞLETİLMİŞ ÖZET

Balistik, insanı dış etkenlere ve birbirlerine karşı korumak amaçlı geçmişi çok eskilere dayanan bir bilim dalıdır. İlk çağlardan günümüze gelene kadar çok gelişmeler yaşayan balistikte koruma konusu insan hayatının önem kazandığı her geçen gün daha da dikkat konusu olmuştur ve küresel anlamda geniş bir pazara sahip olmaktadır.

Balistikte koruma amaçlı malzeme üretimi, kullanılacak yer ve koşullara göre farklılık göstermektedir. Kişisel koruyucu balistik zırhlar, genelde çelik yelek olarak adlandırılır ve yumuşak ve sert zırhlar olarak iki sınıfta incelenir. Yumuşak zırhlar giyilebilir personel koruyucuları iken sert zırhlar ise genelde kompozit ya da alaşımlardan oluşan levha şeklindeki malzemelerdir.

Balistik koruyucular olarak genelde kişisel koruyucularda kullanılan ve bir savaş ya da çatışma anında kolayca kullanılabilen küçük boyutlu plakalar da mevcuttur. Bu plakaların genelde kompozit malzeme oldukları görülmektedir. Bu balistik malzemelerin üretiminin yanı sıra koruyuculuğunun önem arzetmesinden dolayı dünyada kabul görmüş olan standartları vardır. Bu standartlar arasında en güvenilirliği yüksek olan ve en çok kullanıma sahip olan ise NIJ standartlarıdır. Kişisel (Personel, Body) balistik koruyucu üretiminde kullanılan NIJ standardı ise NATO'nun da kabul edip uygulamaya koyduğu NIJ STAND-0101.04 olarak yer almaktadır ancak 2008 de NIJ STAND-0101.06 olarak güncellenmiştir. NIJ standardının uygunluğunun bulunması ve üretilen malzemenin balistik dayanımının belirlenmesi için bazı testler vardır. Malzeme dayanımının seviyesini belirlemede genelde V_{50} limit hız testi uygulanır. Bu testte malzemeye dört atış yapılır, yapılan bu dört atıştan ikisi malzemede tam delinme sağlarken diğer ikisi ise tam delinme sağlamaması istenir ve bu dört atış yapılan mermilerde en düşük hızla en yüksek hıza sahip mermi arasındaki hız farkının 18,29 m/sn olması istenmektedir.

Balistikte koruyucu olarak üretilen malzemelerin genelde üretim malzemeleri tekstil ürünleridir. Tekstil ürünlerinden lif ya da kumaştan yapay

(sentetik) olarak üretilmiş ürünler dayanımları ve hafiflikleri ile balistikte önemli bir yere sahiptir. Balistikte koruyuculuğun yüksek olması istenildiğinden dolayı genelde üretilen lifin mekanik özelliklerinin üst seviye olması ve yoğunluğunun, hafiflik sağlaması amaçlı, düşük olması istenmektedir. Tekstil ürünlerinden olan bu liflerden; karbon lifi, aramid lifi, polibenzimidazol lifi (PBI), p-fenilen-2,6-benzobisoksazol lifi (PBO), Poli(Piridobisimidazol) (PIPD), ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE) lifi ağırlıklı olarak balistikte kullanılmaktadır. Ancak tekstil malzemelerinin de koruyuculuğu sınırlı olduğu için balistikte tek katlı tekstil malzemeleri yetersiz kaldığı için çok katlı yapılar oluşturulmuştur. Balistik performansta yetersiz kalınan durumlarda tekstil malzemeleriyle farklı malzemelerin birleşimi ile balistik dayanımları üst seviyelere ulaşan yeni bir malzeme olan kompozit malzemeler üretilmektedir. Balistik koruyucu malzeme amaçlı kompozit malzeme üretiminde, takviye eleman olarak tekstil malzemesinin yetersiz kalan özelliğini tamamlamak için, genellikle bir diğer balistik takviye olan, toz formunda seramik malzeme kullanılmaktadır. Balistik amaçlı kompozitlerde matris malzemesi genellikle polimer malzeme olup, en sık epoksi kullanılır. Seramik tozlar üretilecek malzemeye tokluk, sertlik katar ve malzeme üzerinde ek bir katman oluşturarak merminin kinetik enerjisinin sönümlenmesinde yardımcı olur. Matris malzemesi ise tekstil takviyesi ve seramik toz arasında bir yapıştırıcı olarak görev alarak bir arada bulunmalarını sağlar. Balistik amaçlı kompozit malzemelerin üretiminde ağırlıklı olarak; elle yatırma, reçine transfer, vakum infüzyon, sıcak ve soğuk pres, otoklav gibi çeşitli üretim yöntemleri kullanılır.

Bu tez çalışmasında, balistik malzeme üretiminde tekstil takviyeli kompozitler araştırılmış ve performansları ortaya konulmaya çalışılmıştır. Tezde balistikle ilgili koruyuculuk seviyelerine yönelik bilgiler verilmiş, tekstil takviyeleri lif ve kumaş olarak ayrı ayrı incelenmiş, daha sonra tekstil takviyeli balistik kompozitlerle ilgili güncel yapılmış çalışmalar özellikle performansları ele alınarak verilmeye çalışılmıştır. Çalışmalarda özellikle Kevlar kumaş takviyelerin

kompozit balistik üretiminde farklı katmanlar halinde kullanıldığı görülmüştür. Kumaş yapısı olarak bezayağı kumaş yapısının daha yüksek performans verdiği, en az 20 kat kumaş yapısının kullanılmasının etkili bir balistik performans gösterdiği görülmüştür. UHMWPE lif demetlerinin takviye olarak lif (filament iplik) olarak en iyi performanslı malzeme olduğu görülmüştür.

TEŞEKKÜRLER

Yüksek Lisans eğitimimde ve tez çalışmamın her anında bilgi ve tecrübeleriyle her zaman bana ve çalışmama katkıda bulunan, bu çalışmayı sabır ve özenle inceleyen danışman hocam sayın Prof. Dr. Emel Ceyhun SABIR' EKa teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Yüksek lisans eğitimim boyunca beni yetiştiren Çukurova Üniversitesi Tekstil Mühendisliği Bölüm Başkanı Prof. Dr. Tuğrul OĞULATA' ya ve Bölümün Öğretim üyelerine, akademik ve idari personellerine teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Hayattaki yegâne destekçilerim sevgili annem ve babama her şey için çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER **SAYFA**

ÖZ II
ABSTRACT III
GENİŞLETİLMİŞ ÖZET IV
TEŞEKKÜRLER VIII
İÇİNDEKİLER IX
TABLO DİZİNİ XIII
ŞEKİL DİZİNİ XVII
1. GİRİŞ 1
1.1. Yüksek Lisans Tez Çalışmasının Amacı 7
1.2. Yüksek Lisans Tez Çalışmasının Bölümleri 7
2. BALİSTİK 9
2.1. Balistik Korumanın Değerlendirilmesinde Kullanılan Sistemler 12
2.2. Balistik Koruma Standartları 15
2.3. Balistik Korumayı Belirleyen Testler 22
2.3.1. Balistik Limit V_{50} Testi 22
2.3.2. Stanag 2920 testi 23
2.4. Balistik Koruma Amaçlı Kullanılan Tekstil Malzemelerinde Enerji Emilimi 25
3. BALİSTİK AMAÇLI KULLANILAN LİFLER 37
3.1. Karbon Lifi 37
3.1.1. Karbon Liflerinin Sınıflandırılması 38
3.1.2. Karbon Liflerinin Üretim Prosesleri 40
3.1.3. Karbon liflerinin özellikleri 43
3.1.4. Karbon Liflerinin Kullanım Alanları 46
3.2. Aramid Lifi 48
3.2.1. Aramid Üretim Prosesleri 49
3.2.2. Aramid Liflerinin özellikleri 52

3.2.3. Kevlar® Lif Türlerinin Kullanım Alanları 55
3.3. Polibenzimidazole (PBI) Lifi 57
3.3.1. Polibenzimidazolün Genel Yapısı ve Polibenzimidazol Liflerinin Sentezlenmesi 59
3.3.2. Polibenzimidazol Liflerinin Genel Özellikleri 62
3.3.3. Polibenzimidazol Liflerinin Kullanım Alanları 64
3.4. PBO (p-fenilen-2,6-benzobisoksazol) Lifleri 66
3.4.1. PBO Lif Çekimi ve Üretim prosesi 67
3.4.2. PBO Lif Özellikleri 69
3.4.3. PBO lifinin balistik amaçlı kullanımı 74
3.5. PIPD (Poli(Piridobisimidazol)) (M5®) Lifi 76
3.5.1. PIPD Lif Çekimi ve Lif Özellikleri 77
3.5.2. PIPD Liflerinin Özellikleri 79
3.5.3. PIPD Liflerinin Diğer Özellikleri 84
3.5.4. PIPD Liflerin kullanım alanları 84
3.6. UHMWPE (ultra high molecular weight polyethylene (Ultra yüksek molüküler ağırlıklı polietilen) Lifleri 85
3.6.1. UHMWPE (Ultra Yüksek Moleküler Ağırlıklı) Liflerin Üretim Prosesleri 86
3.6.2. UHMWPE (Dyneema® ve Spectra®) Liflerinin Özellikleri 90
3.6.3. UHMWPE (Dyneema®) Liflerinin Savunma Sanayinde Kullanımı… 96
3.7. Bazı yüksek performans liflerin özelliklerinin değerlendirilmesi 97
4. BALİSTİK AMAÇLI KULLANILAN KUMAŞ YAPILARI 101
4.1. Kumaş Konstrüksiyonu 103
4.2. Kumaşlarda Hata Mekanizmaları 111
4.3. Kumaşların Balistik Performansı için Önemli Konular 112
4.3.1. Lif Özellikleri 112
4.3.2. Kumaş Mimarisi 113

4.3.3. Mermi Geometrisi ve Kumaş Hasarı 115
4.3.4. Kumaş Sınır Koşulları 120
5. TEKSTİL TAKVİYELİ BALİSTİK KOMPOZİTLER 125
5.1. Kompozit 125
5.2. Kompozit Malzeme Üretiminde Kullanılacak Malzemeler 130
5.2.1. Matris Malzemesi 131
5.2.2. Takviye malzeme çeşitliliğine göre kompozitler 137
5.3. Kompozit Malzeme Üretim Yöntemleri 141
5.3.1. Elle Yatırma (Hand Lay Up) Yöntemi 141
5.3.2. Kapalı kalıpta soğuk veya sıcak pres yöntemi 146
5.3.3. Vakum İnfüzyon Yöntemi 146
5.3.4. Reçine transfer kalıplama (resin transfer molding) RTM 149
5.3.5. Pultrüzyon Yöntemi 151
5.3.6. Püskürtme (sprey) Yöntemi 152
5.3.7. Lif (Elyaf) Sarma (Filament Winding) yöntemi 153
5.3.8. Otoklav Pişirme (Autoclave Cure) 155
5.4. Balistikte Tekstil Takviyeli Kompozit Ürünler ve Çalışmalar 156
6. SONUÇ 183
KAYNAKLAR 193
ÖZGEÇMİŞ 213

TABLOLAR DİZİNİ **SAYFA**

Tablo 1.1.Yüksek dayanıma sahip liflerin mekanik özellikleri 2
Tablo 1.2.FSP 100m / s farklı yapıdaki tek katmanlı kumaşları etkiledikten sonra girinti ve harcanan enerji. 4
Tablo 1.3.Dokuma şekilleri farklı olan para-aramid kumaşların dayanımı ve esneklikleri. 4
Tablo 2.1. Balistik koruyucular için kullanılan standartlar 15
Tablo 2.2. NIJ-STD-0101.04 standardı koruma seviyeleri 17
Tablo 2.3.NIJ-STD-0101.06 standardında belirtilen balistik koruyucular için koruma seviyeleri 21
Tablo 3.1. PAN liflerinin karbonizasyonu 42
Tablo 3.2. Karbon liflerinin mekanik özellikleri 44
Tablo 3.3. PAN esaslı karbon liflerinin özellikleri 45
Tablo 3.4. Zift bazlı karbon lifleri özellikleri 45
Tablo 3.5. Aramid lifleri tescilleri ve çeşitleri 49
Tablo 3.6. Aramid tipleri 53
Tablo 3.7. Çeşitli Kevlar® türlerinin dayanım özellikleri 53
Tablo 3.8 Bazı aramid liflerinin mekanik özellikleri 54
Tablo 3.9. PBI lifin raf ömrünün uzatılması için lityum klorit ilavesi. 60
Tablo 3.10. Isı dayanımı yüksek olan bazı liflerin polimer çözeltisi ve maksimum kullanım sıcaklığı 61
Tablo 3.11. PBI liflerinin özelliklerinin diğer lifler ile karşılaştırması 62
Tablo 3.12. PBI liflerinin termal dayanımı 63
Tablo 3.13. Oda sıcaklığında çeşitli yüksek performans liflerin Elastisite Modülleri 71
Tablo 3.14. Bazı yüksek performans liflerinin LOI değerlerine göre karşılaştırılması 73

Tablo 3.15.Yüksek Performanslı Liflerin Mekanik ve Fiziksel Özellikleri karşılaştırılması 74
Tablo 3.16. PIPD lifleri ile diğer yüksek performans lifleri ile karşılaştırılması 82
Tablo 3.17. LOI değerleri yüksek bazı lifler 83
Tablo 3.18.UHMWPE (Dyneema®) liflerinin diğer bazı yüksek mukavemete sahip liflerle karşılaştırılması 91
Tablo 3.19. UHMWPE olan Dyneema® lifleri 92
Tablo 3.20 Dyneema® liflerinin mekanik özellikleri 92
Tablo 3.21. Dyneema® liflerinin mekanik özelliklerinin sıcaklıkla yüzde olarak değişimi 93
Tablo 3.22. Dyneema® liflerinin termal özellikleri 93
Tablo 3.23. Dyneema® liflerinin fiziksel özellikleri 94
Tablo 3.24. Dyneema®® liflerinin optik özellikleri 95
Tablo 3.25. Dyneema® liflerinin tutuşurluk özellikleri 95
Tablo 3.26. Bazı yüksek performanslı liflerin karşılaştırılması. 98
Tablo 3.27. Geçmişten günümüze kadar gelen yüksek dayanıma sahip ve yoğunlukları düşük teknik tekstil hammaddeleri. 100
Tablo 4.1. Çeşitli kumaş yapılarının dayanımı ve esneklikleri 105
Tablo 4.2. Çeşitli kumaş konstrüksiyonları ve mermi tipleri için tek katmanlı limit hız. 105
Tablo 4.3. FSP 100m/s farklı yapıdaki tek katmanlı kumaşları etkiledikten sonra girinti ve harcanan enerji 106
Tablo 4.4.FSP, farklı yapıdaki 7 katmanlı kumaşları çarptıktan sonra hız ve harcanan enerji miktarı 106
Tablo 5.1. Lif ve mühendislik malzemelerin bazı mekanik özellikleri karşılaştırılması 128
Tablo 5.2. Deney planı kullanılan konfigürasyonları, her bir bileşenin tabaka sayısı, alan yoğunluğu ve kompozitlerin kalınlıkları 158

Tablo 5.3. Split Hopkinson basınç vuruş çubuğunun hızı, kalınlığı, test numunelerinin çapı ve gerinim oranı 160
Tablo 5.4 9mm 925 Luger FMJ mühimmat için V_{50} balistik limit sonuçları..... 161
Tablo 5.5 44 Mag Lead SWC mühimmat için V_{50} balistik limit sonuçları..... 162
Tablo 5.6 STF / Kevlar® ve C-STF / Kevlar® kompozitlerinin tanımı ve ayrıntılı verileri..... 164
Tablo 5.7 GFRP'nin malzeme özellikleri..... 168
Tablo 5.8 Kullanılan aramid liflerinin özellikleri 171
Tablo 6.1 NIJ-STD-0101.06 standartı koruma seviyeleri..... 184
Tablo 6.2 Yüksek mukavemet dayanımlarına sahip teknik tekstil liflerinin mekanik özellikleri karşılaştırılması 186
Tablo 6.3. Çeşitli kumaş konstrüksiyonları ve mermi tipleri için tek katmanlı limit hız. 188

ŞEKİLLER DİZİNİ **SAYFA NO**

Şekil 1.1. Kompozit malzemeden elde edilmiş Balistik zırh sisteminin V_{50} performansı 6
Şekil 2.1. Roma zamanında bazı vücut koruyucu zırhlar 9
Şekil 2.2. İç balistik dış balistik ve hedef balistiğin şematik olarak gösterimi 10
Şekil 2.3. a) Mermi tipleri b) Değişik kalibreye sahip mermiler 16
Şekil 2.4. Balistik test esnasında insan tenini simüle eden ve hedef zırh arkasına yerleştirilen şartlandırılmış dolgu maddesi 19
Şekil 2.5. NIJ Standartı vücut koruyucu zırhlar için test düzeneği) 20
Şekil 2.6. Test için merminin atışlarının yapılacağı yerler 20
Şekil 2.7. V_{50} hız limit testi gösterim şekli örneği 23
Şekil 2.8. US-MIL-P-46593'te tanımlanan parçalamayı taklit edici parçacıklar (Fragment Simulating Projectiles) 25
Şekil 2.9. Merminin life temasının simülasyonu 28
Şekil 2.10. Primer ve sekonder lifler 28
Şekil 2.11. Tek katmanlı kumaşta darbenin meydana getirdiği gerilimler (a) yandan, (b) üstten ve (c) alttan görünüşü 30
Şekil 2.12. Çeşitli balistik liflerin dalga hızı - enerji sönümleme kapasitesi grafiği 30
Şekil 3.1. Karbon lifi çekim prosesleri 40
Şekil 3.2. PAN öncüsünden oksidatif stabilizasyon ile basamak polimerin oluşması 41
Şekil 3.3. Karbon liflerinin dokunmuş hali ile elde edilen kumaş örneği 47
Şekil 3.4. Karbon lifinden elde edilmiş bazı ürünler ve kompozit olarak kullanılmış askeri miğfer 48
Şekil 3.5. Sıvı kristalin çözeltinin şematik gösterimi. 50
Şekil 3.6. (a) Poliamid 6 (b) PPTA liflerinin içyapısının şematik gösterimi 52

Şekil 3.7. Aramid kumaş ve aramid kumaştan üretilmiş balistik koruyucu yelek ve kask 57
Şekil 3.8. Polibenzimidazolün (PBI) kimyasal yapısı. 58
Şekil 3.9. Sülfirik asit ile işlem görmüş polibenzimidazol polimer yapısı 59
Şekil 3.10. PBI lifi kuru çekim üretimi için işlem basamakları 60
Şekil 3.11. PBI stapel lifleri ve mikroskobik görüntüleri 62
Şekil 3.12. Sıcaklık artışı ile PBI liflerindeki büzülme oranı 63
Şekil 3.13. PBI liflerinin hava ve nitrojen ile termogravimetrik analizi 64
Şekil 3.14. PBI Lifleri Ve Kevlar®'dan elde edilen ısıya dayanıklı malzemeler .. 66
Şekil 3.15. Süper kritik CO2 yıkama sistemi 69
Şekil 3.16. a) PBO filament lifleri, b) PBO Stapel lifleri 70
Şekil 3.17. 500ºC sıcaklık altında işlem gören PBO ve aramid liflerinin korunan mukavemet yüzdeleri. 73
Şekil 3.18. a) Darbe hasarı sonrası 3 katmanlı iki boyutlu PBO (Zylon®) lifli kumaş, b) Darbe hasarı sonrası PBO lif içeren balistik koruma sağlayan yelek c) 3 boyutlu ortogonal PBO (Zylon®) lifli kumaş 76
Şekil 3.19. PIPD ve PBO polimerlerinin kimyasal formülleri ve bu polimerlerin kristal yapısı 77
Şekil 3.20. PIPD polimerinden lif çekimi basamakları sırasında lif yapısının oluşum şeması:1-nematik faz, 2-oryante olmuş nematik faz, 3-kristal solvat, 4-kristal hidrat, 5-susuz yapı 79
Şekil 3.21. PIPD PBO ve PBT liflerinin mukavemet- uzama grafiği 81
Şekil 3.22. Jel iplik eğirme işleminin şematik gösterimi 86
Şekil 3.23. Sıkıştırma yüklü jel bükülmüş UHMWPE liflerindeki bükülme bantlarının SEM resmi 87
Şekil 3.24. Dyneema® filamentindeki bir düğümün SEM resmi 88
Şekil 3.25. Bir tıraş bıçağının kesme kenarı boyunca gerilmiş bir Dyneema® filamentinin SEM resmi 89

Şekil 3.26. Dyneema® Lif ve Kompozit Ürünlerinden Yapılmış Bazı Savunma Alanındaki Örnekler 96
Şekil 3.27. Balistik korumalar için Dyneema® kompozitlerinin uygulamaları ile bazı balistik koruyucu malzemeler 97
Şekil 4.1 Dört dokuma mimarinin sonlu eleman modellemesi 102
Şekil 4.2 Benzer örgü yoğunluğuna sahip dört farklı kumaş mimarisine göre mermi hızlarının sayısal sonuçlarının karşılaştırılması 102
Şekil 4.3. Çalışmada kullanılan a) 1/1 bezayağı, b) dimi, c) saten, d) 3*3 sepet örgü yapılarının desenleri 104
Şekil 4.4.Çarpma sonrası sepet kumaşları 107
Şekil 4.5. a) kumaş kelepçe, b) yüksek hızda etkilenen kumaş, c) yüksek hız etkisinden sonra kumaşın arkasında hamuru kil yüzeyine girinti, d) yüksek hız etkisinden sonra hamuru kil üzerinde görünen bir girinti kesiti 108
Şekil 4.6 Kullanılan mermi başlıklarının (çekirdeklerinin) şekilleri 116
Şekil 4.7. Deneyin kuramsal olarak düzenlenmesi 117
Şekil 4.8. Kumaş tarafından emilen enerji miktarı 117
Şekil 4.9. Mermi şekillerinin kumaş üzerindeki çıkarken bırakılan etki (Yaklaşık 200 m / s'de) 118
Şekil 4.10. Düz kafalı merminin kumaş liflerini kesmesi 118
Şekil 4.11. Dört farklı mermi çeşidi ile dört farklı hız sınırı testindeki Twaron® kumaştaki yırtılma ve kayma etkileri 119
Şekil 5.1.Seçilmiş takviye edici liflerin spesifik özellikleri 127
Şekil 5.2. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması ve görseli a) Lif takviyeli kompozitler, b) Partikül takviyeli kompozitler, c) Pabakalı kompozitler, d) Dolgu takviyeli kompozitler 130
Şekil 5.3. Sürekli liflerin örgü çeşitlerinden örnekler 139
Şekil 5.4.Elle Yatırma Yönteminin Gösterimi 142
Şekil 5.5.Presleme ile kompozit malzeme üretim yöntemi. 146

Şekil 5.6. Vakum infüzyon yöntemi 148
Şekil 5.7. Vakum takviyeli reçine transfer kalıplama yöntemi 149
Şekil 5.8. Pultrüzyon sürecinin şematik gösterimi 151
Şekil 5.9. Püskürme yöntemi ile kompozit malzeme üretimi 153
Şekil 5.10.Filament sarma yöntemi ile kompozit üretim şeması 154
Şekil 5.11. Otoklav sisteminde kompozit malzeme üretim gösterimi 156
Şekil 5.12. Split-Hopkinson basınç çubuğunda kullanılan test örnekleri: (a) UHMWPE-100; (b) UHMWPE-75 / ARA-25; (c) UHMWPE-50/ ARA-50; (d) UHMWPE-25 / ARA-75 ve (e) ARA-100..... 159
Şekil 5.13 (a) STF'nin farklı hacim fraksiyonu, (b) farklı CNT konsantrasyonları ve (c) farklı katmanlar altında kalan hız sonuçları, olay hızlarını değiştirir. Semboller deneysel sonuçlardır ve düz çizgiler Recht-Ipson bağlantı sonuçlarıdır. (d), (e) ve (f), karşılık gelen enerji yayılım sonuçları. Kesintisiz çizgiler Recht-Ipson fitingiyle elde edilen artık hızlardan hesaplanır. 165
Şekil 5.14 Üst ve yan görünüm altında (a) SN, (b) SF2 ve (c) SC2'nin makroskopik görünümü. (d), (e) ve (f), (a), (b) ve (c) 'ye karşılık gelen kırılmış ipliklerin mikroskopik görünümleri. Ayrıca, (g), (h) ve (i), (d), (e) ve (f) 'ye karşılık gelen büyütülmüş detaylardır 166
Şekil 5.15. Mermi örneği ve GFRP (cam elyaf takviyeli plastik) kompozit hedef plakası 169
Şekil 5.16. Kör merminin etkisiyle lamine GFRP kompozit plakadaki hasar paterni: (a) - (b) Deneysel; (c) - (d) sayısal. 169
Şekil 5.17 Kevlar® kumaşının yük uzama eğrileri. 172
Şekil 5.18. Dolgu% 'sinin bir fonksiyonu olarak çekme gerilmesindeki değişim 173
Şekil 5.19. Dolgu (silika) %' sindeki artış ile gerilme modülündeki artış..... 174
Şekil 5.20. Çekme testi sırasında kompozit numunelerin gerilme-gerinim değiştirme eğrileri..... 175
Şekil 5.21. Çekme testinde hibrit kompozit numunelerin hata davranışı..... 175

Şekil 5.22. Dolgu yükleme hızının bir fonksiyonu olarak çizilen eğilme mukavemeti 177
Şekil 5.23 Bükme testinden sonra delaminasyon gösteren kompozit numuneler. 177
Şekil 5.24. Dolgu yükü ile bükülme modülü % değişimi. 178
Şekil 5.25. Dolgu yüküne karşı darbe dayanımı 178
Şekil 6.1 V_{50} balistik limit hız testi grafiği örneği. 185
Şekil 6.2 PBO liflerinden yapılmış kumaşlar..... 187

1. GİRİŞ

Balistik insan hayatının dış etkenlere karşı korumak amaçlı geçmişi çok eskilere dayanan bir konu olup geçmişten günümüze kadar büyük gelişmeler göstermiştir. Balistik konusunun başlangıcı milattan öncelere kadar dayanmaktadır. Balistikte koruyucu zırhlar gerek yırtıcı hayvanlardan korunmak gerek ise o dönemdeki savaş koşullarına göre yapılmış sert hayvan derileri ve bunlara destek kemiklerden yapılmış malzemeler kullanılmaktaydı. Daha sonraları ise bu hayvan derilerine ek destek olarak çelik hasır dokumaları şeklinde çelik zırhlar ve çelik kasklar kullanılma başlanmıştır. Romalılar ve Yunanistanlılar geliştirdikleri zırhlar yardımıyla zırhların içinde daha rahat hareket etmelerini sağlamışlardır. Zırh modellerinin çağlardaki değişimi 15. ve 16. yüzyıllarda sanki terzilerin ellerinden çıkmışçasına gösterişli ve ergonomik zırhlar yapılmaya başlanmıştır (Akman, 2012). Bu gelişmeler doğrultusunda savunma sanayi adı altında günümüzde birçok balistik çalışmalar ve araştırmalar yapılmıştır.

Balistik konusu günümüzde yumuşak ve sert zırhlar olarak kategorize edilmektedir. Yumuşak zırhlar, birden fazla kumaş veya yumuşak koruyucu katmanlardan (50 kata kadar) oluşan ve ağırlığının yaklaşık 4,5kg altında olması gerekmektedir. Yumuşak zırhların, kişileri 500 m/s hıza kadar çıkabilen enerji etkilerine karşı koruyabilmesi gerekmektedir. Buna ek olarak NIJ (Ulusal Adalet Enstitüsü) Standartları baz alınarak sert zırhlar ve yumuşak zırhtan üretilmiş zırh yelekleri ile beraber kullanıldıklarında NIJ standartlarında yer alan en az IIIA seviyesindeki koruma parametreleri sağlaması gerekmektedir (Azrin Hani ve ark., 2012). Merminin zırha etki etmese dahi merminin enerjisinin zırh malzemesine ve vücuda dağılmasından dolayı vücutta ve cilt yüzeyinde çürüklere ve iç organların kötü durumda hasar görmesine neden olabilmektedir. Yeni balistik koruma malzemeleri ile ilgili birçok çalışma ve araştırmalar; üstün enerji emme kapasitesi, kullanıcının giyilebilir ve hareket kabiliyetini olumsuz yönde etkilenmeme, hafiflik gibi parametrelere odaklanmaktadır. Sürekli gelişmekte olan balistik konusu,

teknolojinin de gelişmesinin etkisi ile gelişen ateşli veya daha etkili silahlar kullanılması ile her geçen gün ilgi konusu olmaya devam etmektedir.

Balistik konusunda koruyucu zırhların, özellikle, merminin ya da şarapnel parçalarının enerjisini sönümleme yeteneğine sahip olması beklenmektedir. Buradan yola çıkılarak, öncelikle ergonomik olması amacı ile balistik tekstil malzemeleri geliştirilmiştir. Bu tekstil malzemelerinin başında tekstil hammaddeleri olan liflerin geliştirilmesi gelmektedir. Genellikle yapay (man-made) olan insan yapımı yüksek modül ve yüksek mekanik dayanımlı lifler ön plana çıkmaktadır. Bu amaçla bazı firmalar ve araştırmacılar balistik amaçlı ve çok yüksek dayanımlı bazı uygulamalar için lifler elde etmişlerdir. Bu lifler Cam lif, poli(fenilen tereftalamid) (Kevlar® ve Twaron®), yüksek modüllü polietilenler (Dyneema® ve Spectra®) ve poli-fenilen-benzobisoksazol (PBO) (Zylon®) gibi kumaş malzemeleri, yumuşak vücut zırhları için kumaş malzemeler olarak yaygın olarak kullanılmıştır. Bu lif çeşitlerinden yararlanılarak kumaşlar elde edilmektedir. Balistik amaçlı kumaşlar için üretilen bu liflerin Tablo 1.1.' de yoğunluk, modül ve mekanik dayanımları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Yumuşak vücut zırhların tasarımında kullanılan kumaşlarda yüksek mukavemet ve yüksek modül en önce dikkat edilen özelliktir. Ancak tek kat kullanılan balistik kumaşlar yeterli koruma koşullarını sağlayamayacağı için çok katlı olarak kullanılmaktadır. Balistik etki sırasında, mermiden gelen kinetik enerji çoklu kumaş katmanları tarafından emilmektedir. Darbe noktasında üretilen gerilim dalgalarının taşıdığı kinetik enerji, lif deformasyonu ve lifler arası sürtünme ile birbirlerinin arasından kayarak dağıtılmaktadır. Dağıtılamayan enerji, merminin tamamen nüfuz etmesini durdurana kadar her kumaş katmanı tarafından emilmektedir. Buda yumuşak vücut zırhlarında tek kat balistik amaçlı kullanılan kumaşların yetersiz olduklarını ortaya koymaktadır (Azrin Hani ve ark. 2012).

Tablo 1.1. Yüksek dayanıma sahip liflerin mekanik özellikleri

Malzeme	Yoğunluk (g/cm^3)	Gerilme direnci (MPa)	Çekme modülü (GPa)	Uzama %
Polipropilen	0.83	500	2	6
E-cam	2.57	2750	73	2.5
S-cam	2.48	4710	-	2.8
Karbon lifi	1.75	4000	131	2.8
Örümcek ağı	1.3	2000	30	30
Aramid (Kevlar®, Twaron®)	1.44	3200	131	4
UHMWPE (Dyneema®,Spectra®)	0.97	3400	111	4-5
Vectran®	1.4	3200	75	3.3
Zylon® (PBO)	1.54	5800	180	2.5

Bu liflerden elde edilen balistik kumaşların üretiminde mekanik özelliklerini etkileyen en önemli etkenlerinden biri de kullanılan kumaşların dokuma konstrüksiyon yapılarıdır.

Chua ve Chena 2010 da ki çalışmalarında; 1/1 plain (bez ayağı), twill (dimi), satin (saten) ve 3*3 basket (sepet örgü) olarak 4 farklı dokuma şekli kullanmışlardır. Kullanılan hammadde ve yoğunluk açısından karşılaştırılmış, aynı özellikteki para-aramid kumaşlar balistik testlere tabi tutulmuş ve farklı dokuma konstrüksiyonlarındaki kumaşların mukavemeti ve sertliği gösterilmiştir. Test edilen kumaşlar arasında balistik amaçlı 3×3 sepet, 1/1 bezayağı ve 1/3 dimi örgüler en yüksek mukavemet değerlerini sağlamıştır. Aynı zamanda bu malzemelerin, gerilme uzaması ≥ % 10 ile oldukça iyi bir esneklik göstermektedir. En zayıf malzeme, 8H saten kumaş olmuştur. Tablo 1.2.' de bu çalışmada kullanılan kumaşların özgül ağırlıkları, kalınlıkları, kullanılan limit hızlarına karşılık emilen enerjileri incelenmiştir. Bunlara ek olarak da 1/3 ve 2/2 dimi dokuma malzemelerini karşılaştırarak, mukavemetlerindeki düşük farka rağmen,

sertliklerinde kayda değer farklılıklar gösterdiğine ulaşmışlardır. Ayrıca, 1/3 dimi oldukça esnek, 2/2 dimi ise oldukça sert bir yapıda kumaş olduğunu gözlemlemişlerdir. Benzer bir durum 2×2 ve 3×3 Sepet dokuma malzemeleri için de gözlenmiştir: 3x3 sepet örgü daha esnektir. Tablo 1.3.' de bu çalışmada kullanılan kumaşların dokuma farklılıklarından kaynaklanan balistik sonuçların karşılaştırılmış olarak gösterilmiştir. Buradan dokuma kumaş yapılarının mermi etkilerine karşı önemli olduğu görülmüştür.

Tablo 1.2. FSP 100m / s farklı yapıdaki tek katmanlı kumaşları etkiledikten sonra girinti ve harcanan enerji (Chua ve Chena 2010).

No	Kumaş yapısı	Numune kalınlığı, mm	Numune özgül ağırlığı, g/m^2	Penetrasyon derinliği, mm	Defarmasyon oranı X 10^4, mm	Limit hız Vr, m/s	Dağılmış enerji , J	Normalize edilmiş dağılan enerji*, J
1	1/1 bezayağı	0.47	268	6	1.67	61.2	138	513
2	8H saten	0.52	328	5	2.00	57.5	147	449
3	1/3 dimi	0.46	256	7	1.43	64.9	127	497
4	2/2 dimi	0.45	276	7	1.43	64.9	127	461
5	2*2 sepet	0.45	316	6	1.67	61.2	138	435
6	3*3 sepet	0.70	506	5	2.00	57.5	147	291

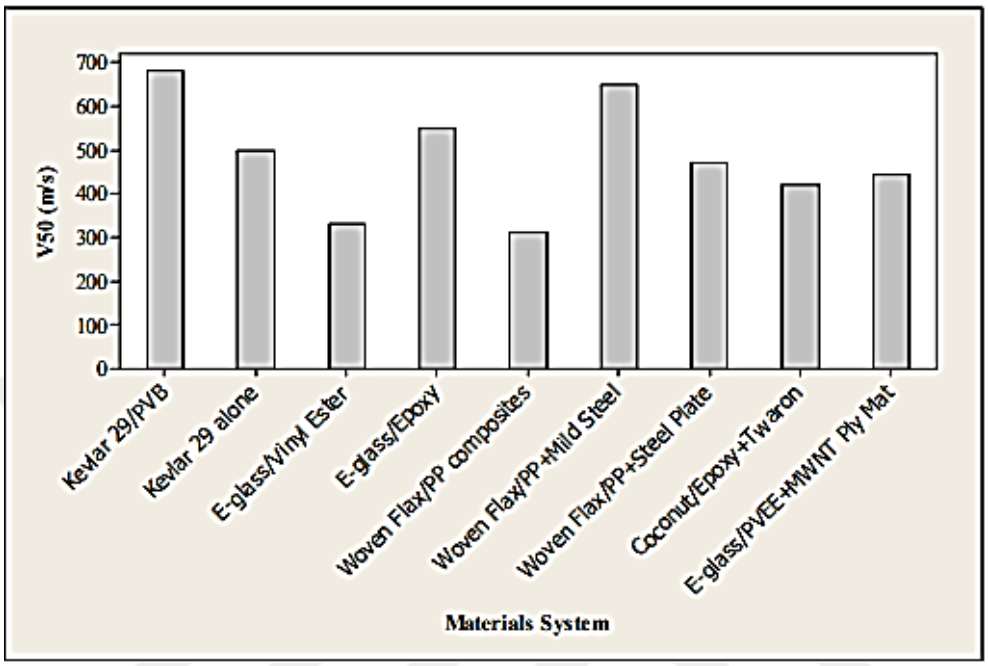
* - Maksimum mukavemetin değeri 1,0 mm kumaş kalınlığına normalleştirilir.

Tablo 1.3. Dokuma şekilleri farklı olan para-aramid kumaşların dayanımı ve esneklikleri(Chua ve Chena 2010).

No	Kumaş yapısı	KalınlıK, mm	Çekme uzaması, mm	Maksimum güç, kN	Maks. normalize edilmiş güç*, kN
1	1/1 bezayağı	0.47	17.6	9.5	20.2
2	8H saten	0.52	7.9	7.9	15.1
3	1/3 dimi	0.46	14.3	9.1	19.8
4	2/2 dimi	0.45	7.6	8.6	19.2
5	2X2 sepet	0.45	9.9	8.7	19.3
6	3X3 sepet	0.70	20.8	15.0	21.4

* - Maksimum mukavemetin değeri 1,0 mm kumaş kalınlığına normalleştirilmiştir.

Balistik amaçlı üretilmiş kumaşlar üzerine yeni geliştirme çalışmaları yapılmıştır. Özellikle yüksek performanslı liflerden üretilen kumaşlardan elde edilen kompozit malzemeler günümüzde ağırlıklı olarak araştırma konusudur. İnsan hayatını koruması için geliştirilen balistik zırhlar, günümüzde önceleri sadece birer deri, kumaş ya da çelik kullanılması ile elde edilmiş olsada, artık doğadaki neredeyse bütün malzemelerin karışımlar ile elde edilen kompozit malzemelerin kullanılmasına başlanmıştır. Kompozit; en az iki malzemenin iyi özelliklerinden esinlenilerek bu iki veya daha fazla malzemenin üstün yanlarını bir araya getirilmesi ile elde edilir. Bağımsız sert zırh plakaları, genelde, 1,4 kg ila 3,0 kg arasındadır. Sert vücut koruyucu zırhlar genellikle yumuşak vücut koruyucu zırhından daha etkin koruma sağlamaktadır. Askeri personeller ve kolluk kuvvetleri, yüksek saldırı riski olasılığı bulunduğundan bu tür bir koruma kullanabilirler, ancak günlük hayatta kullanım gerektiren yerlerde genellikle yumuşak vücut zırhı olarak sıradan bir gömlek veya ceket gibi esnek olan koruma sağlayacak malzemeler giymektedirler. Genelde sert vücut zırhları seramik karolar metal plakalar veya bor karbür veya silisum karbür içerikli plakalardan oluşmaktadır (Risby ve ark., 2008). Balistik zırh konusunda da çeşitli kompozit malzemeler üretilmektedir. Kompozit malzemelerin temelinde en az iki malzemenin üstün özelliklerinden yararlandığı doğrultusunda balistik zırh içinde en hafif ürünlerin tekstil malzemelerinden elde edileceği öngörüsünün doğrultusunda balistik zırhlarda gerek lif gerekse lif' ten mamul olan kumaşların kullanılarak kompozit üretimi sağlanmıştır. Bu kompozitlerin başlıca özellikleri; hafif olmaları, yüksek darbe dayanımları ve üretimde kolay elde ediliyor olmalarıdır. Azrin Hani ve ark. (2012) çalışmalarında, kompozit ürünler ile balistik amaçlı V_{50} testleri ile karşılaştırmış ve bazı kompozit malzemelerin balistik verimini incelemişlerdir. Çalışmada kompozite takviye olarak tekstil ürünlerinin kullanılmasının bir seramik plakanın sağladığı koruma seviyesine yakın seviyede koruma sağladığı ve daha üstün olarak seramik plakadan daha hafif olduğu gösterilmiştir. Şekil 1.1.' de Azrin Hani ve ark.' nın yaptıkları çalışma sonuçları özetlenmiştir.



Şekil 1.1. Kompozit malzemeden elde edilmiş Balistik zırh sisteminin V_{50} performansı (Azrin Hani ve ark., 2012)

Dokuma kumaşlar, "balistik dereceli" veya "zırh dereceli" kompozitler olarak adlandırılan benzersiz bir yapısal kompozit sınıfı oluşturmak için reçine ile uygulaması yapılabilmektedir (Lee ve ark., 2001).

Tekstil takviyeli kompozitlerin balistik amaçlı kullanım performanslarının araştırılması adlı tez çalışması; çeşitli balistik zırh amacı ile kullanılacak tekstil ürünleri ve tekstil takviyeli kompozit malzemelerin karakterizasyonu ve performansı, zırh panelinin yapım yöntemleri ve balistik enerji emme kapasitesini arttırmak için kullanılan çeşitli teknikler hakkında karşılaştırılmış olarak bir bilgi sunmaktadır. Katma değeri yüksek olan savunma sanayinde çeşitli balistik zırh ürün özelliklerinin geliştirilmesiyle iç ve dış pazarda rekabet oranını artıracağı düşünülmektedir. Hızla gelişen ateşli ve teknolojik silahlarla birlikte katma değeri yüksek, ergonomik, insan hayatını koruma prensibine dayalı ve inovatif balistik

amaçlı zırhların üretimi gereklilik haline gelmiştir. Devamlı gelişme kaydetmesinden dolayı savunma sanayisinin de vazgeçilmez bir parçası halini almıştır. Ayrıca tekstil takviyeli kompozitlerin balistik amaçlı kullanımı hafiflik ergonomi, dayanım ve katma değeri daha yüksek seviyelerde olmasına avantaj sağlayacaktır.

1.1.Yüksek Lisans Tez Çalışmasının Amacı

Bu tez çalışmasının amacı, tekstil yapılarının balistik amaçlı üretilen Kompozit malzemelerde kullanımına dair akademik çalışmaların bir araya getirilmesidir. Çalışmada öncelikle balistik, balistik için önemli lifler, kumaş yapıları anlatılmış, bu konularda yapılmış literatür geniş şekilde verilmiştir. Balistik amaçlı tekstil takviyeli ileri Kompozit malzemeler yenilikçi yaklaşımların ağırlıklı olduğu bir düzende sunulmuştur.

1.2.Yüksek Lisans Tez Çalışmasının Bölümleri

Tez çalışmasının başlangıç bölümünde balistik bilimine balistikle ilgili kavramlara, standartlara yer verilmiştir. **Balistik bölümünde**; balistik konusunun tarihsel gelişimi, balistik çeşitleri, balistik korumanın değerlendirilmesinde kullanılan sistemler, balistik koruma standartları, balistik koruma amaçlı test yöntemleri, balistik koruma amaçlı tekstil malzemelerin enerji emilim sistemleri anlatılmıştır.

Tez çalışmasında balistikten sonra balistik amaçlı kullanılan lifler anlatılmıştır. **Balistik lifler bölümünde**; balistik kullanım amacıyla üretilmiş lif çeşitleri, balistik liflerin üretimleri ve bu liflerin savunma sanayinde balistik zırh olarak kullanımları ve bu amaçlı çalışmalar anlatılmıştır. Balistik amaçlı kullanılan lifler; yüksek modül ve üstün mekanik dayanımları ile ön plana çıkmaktadır. Bu amaca uygun olarak balistik liflerin geliştirilmesine yönelik çalışmalar gerek kumaş elde edilmesi için gerekse kompozit malzeme üretiminde yenilikçi çalışmaları içerek şekilde tezde anlatılmıştır. Bu amaca uygun olarak balistik

liflerle ilgili litaratürde ki araştırmalarda; balistik liflerin geliştirilmesi ile bu üstün özellikli liflerden elde edilen kumaşlardan yumuşak zırhlar ve sert zırhlardan üretilmiş kompozit plakaların savunma sanayinde askeri personel ve kolluk kuvvetlerinin kullandığı kıyafetlerin yapımında kullanımına yönelik çalışmalara yer verilmiştir.

Balistik lifler bölümünden sonra ise; **Balistikte kullanılan kumaş yapıları bölümünde;** balistik amaçlı dokuma kumaş mimari yapıları karşılaştırılması ile ilgili çalışmalara ve balistik koruyucu amaçlı kumaşların balistik testler açısından incelenmesi konuları anlatılmıştır.

Balistikte kullanılan kumaş yapıları bölümünden sonra ise yer verilen konu; **Balistikte tekstil takviyeli kompozit malzemeler bölümü;** kompozit malzemenin önemi ve üretim yöntemleri anlatılmıştır. Tekstil takviyeli kompozit malzemelerin önemine vurgu yapılmış ve bununla ilgili çalışmalardan elde edilen verilere yer verilmiştir.

2. BALİSTİK

Balistik; bir düzenek ya da bir sistem ile ateşlenen, fırlatılan cisimlerin atmosfer ortamında yerçekiminin de etki gösterdiği düzen içinde yapmış olduğu hareketi inceleyen bilim dalı olarak bilinmektedir (Cerit, 2004).

Tarihteki ilk koruyucu zırhlar, sert hayvan derisinden yapılmıştır. Daha sonra deri ile desteklenen kemik ya da metal gibi daha sert maddelerden yapılma halkalar veya parçalar kullanılarak zırhlar sağlamlaştırılmıştır. Tunç ve demirin bulunmasından sonra zırhlarda kullanılarak daha dayanıklı ve sağlam hale getirilmiştir. Truva Savaşı'nda, Yunanlılar tarafından tunçtan miğfer, göğüs zırhı ve tozluk kullanılmıştır. Yaklaşık 1.000 yıl sonrasında Romalılar tarafından daha sağlam olduğu düşünülen demirden miğferler yapılmıştır. Yunanlılar ve Romalılar zırhlarının içinde kolaylıkla hareket edebilmektedir. Zırhı oluşturan parçalar vücuda hareket olanağı sağlayacak biçimde tasarlanmıştır (Akman, 2012). Bu zırhlardan roma zamanında kullanılanlara örnekler Şekil 2.1.' de verilmiştir.

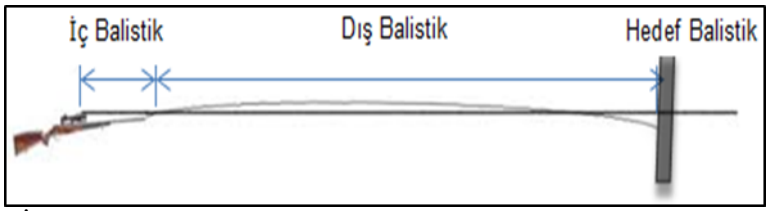
Zırh modellerinin değişmesi ile 15. ve 16. yüzyıllarda, yapımcılar tarafından tıpkı bir terzinin elinden çıkmışçasına gösterişli zırhlar yapılmaya başlandı (Akman, 2012).



Şekil 2.1. Roma zamanında bazı vücut koruyucu zırhlar (tr.sodiummedia.com, 2019)

Günümüzde balistik konusu iç balistik, dış balistik, terminal balistik, yaralanma balistiği ve adli balistik olarak beş grupta incelenmektedir (Akman, 2012).

Ateşli silahlarda tetiğe basıldıktan sonra mermi çekirdeğinin namlunun ağzından çıkıncaya kadar geçen zamanda mermi kovanı ve mermi çekirdeğinin ilerleme halini inceleyen balistik "iç balistik" tir. Mermi çekirdeği namlunun ağzından silahı terk etmesi ve sonra hedefe ulaşıncaya kadar geçen süre zarfında havanın uyguladığı direnç, mermi çekirdeğinin yer çekimi kuvvetine karşı koyuşu, yere düşüşü, sürüklenişi veya denge halinde ilerlemesinin sağlanması ile ilgilenen balistik bölümü “dış balistik” tir. Mermi çekirdeğinin hedefe ulaştığı andan çarptıktan sonra ki, duruncaya kadar delme gücü, enerjisini çarptığı cisme iletmesi gibi etkiler ile ilgilenen balistik "terminal (hedef) balistik" adı altında toplanmaktadır. Bu balistik çeşitlerinin görsel olarak temsilen gösterimi Şekil 2.2.’ de verilmiştir. Yaralanma balistiği terminal balistiğin bir parçası olup insan ve hayvanlarda meydana gelen yaralanmaları inceleyen balistiktir. Ateşli silahlarda kullanılmış mermi çekirdekleri ve kovanların incelenmesi sonucunda merminin belli bir silahtan atıldığını tespit ederek, olaya karışmış diğer silahların ayırımı ise "adli balistik" altında incelenmektedir (Akman, 2012).



Şekil 2.2. İç balistik dış balistik ve hedef balistiğin şematik olarak gösterimi (Uslu, 2007)

İç Balistik

Namlu içerisinde; tetiğe basıldıktan sonra kovanın ateşlenerek barutun yanması ve merminin çekirdeğinin namlu ağzını terk edinceye kadar geçen sürede

mermi kovanı ve mermi çekirdeğinin namlu içinde hareketini ayrıntılı olarak inceleyen balistik kısmıdır (Akman, 2012; www.egm.gov.tr, 2019)

Dış Balistik

Namlu içinden mermi çekirdeğinin namluyu terk etmesi ile başlamakta ve hedefe ulaşıncaya kadar sürede havanın direnci, mermi çekirdeğinin yer çekimi etkisinde kalması, yere düşüşü, sürüklenişi ve dengesi ile ilgilenen balistik çeşididir (Akman, 2012).

Terminal balistik

Mermi çekirdeğinin hedefe çarpmasıyla, duruncaya kadar yaptığı delme gücü, enerjisini çarptığı cisme iletmesi ve verdiği hasar gibi etkileri inceleyen balistik kısmıdır (Akman, 2012).

Yaralanma Balistiği

Terminal balistiğin bir parçası olan bu balistik çeşidi insan ve hayvanlarda merminin ya da balistik etki oluşturan cisimlerden meydana gelen yaralanmaları incelemektedir (Akman, 2012; www.egm.gov.tr, 2019).

Adli Balistik

Ateşli silahlarda kullanılmış mermi çekirdekleri ve kovanların incelenmesi sonucunda belli bir silahtan atıldığını tespit ederek, olaya karışmış ya da karışmamış diğer silahlardan ayırılmasını konu alan inceleyen balistik çeşididir. Saçmaların dağılış şeklinden, barut artıklarının ve mermi çekirdeğinin şekli ve hareketinden, atış mesafesini inceleyen balistik kısmıdır.

Balistik koruma, çeşitli ebatlarda, hızlarda ve şekillerde son teknoloji silahlar, mermiler ve şarapnellere karşı vücudu ve başı korunmayı amaçlamakta olup askeri amaçlı gerekli bir fonksiyonel özelliktir. Balistik koruyucu kıyafetler ve malzemeler, mermilerin ve şarapnellerin parçalarının kinetik enerjilerini absorbe

ederek vücudu korumayı veya yaralanmaları en aza indirmeyi amaçlamaktadır (Akman, 2012; Çay ve ark.2007).

Balistik yelekler, kasklar ve vücut koruma zırhları, darbenin etki anında insan ve hayvan vücudunu yüksek hızda oluşan darbelerin etkisinde yaralanmalara karşı korunması amacıyla tasarlanmış malzemelerdir (Turan, 2007). Bunlara ek olarak balistik koruma amacıyla kullanılan yüksek mukavemetli malzemeler ve tekstil ürünleri uçak ve taşıtların iç dizaynında personel ve insan hayatını balistik darbelere karşı direnç sağlamak ve koruma amacı için kullanılmaktadır (Çay ve ark. 2007).

2.1.Balistik Korumanın Değerlendirilmesinde Kullanılan Sistemler

Yaralanmaları ve personel korunmasını sağlayan balistik alanı dış balistik ve terminal (hedef) balistiğinden yola çıkılarak değerlendirilmektedir. Balistik korumanın değerlendirilmesi mermi çekirdeğinin namlunun ucunu terk etmesinden, hedefe varıncaya kadar havadaki kat ettiği yolu ve hedefte oluşan hasarlarla ilgilenmektedir.

Dış balistik, çok eskiden bu yana kadar eksik bir yönleri olmuştur. Çünkü hedefe doğru yapılmış düz atışlarda, mermi yörüngesinin de düz bir doğrultu halinde; dikey atışlarda ise ikizkenar üçgen şeklinde düşünülmekteydi. Ancak, 1537 yılında Venedik' li Tartaglia, yörüngelerin daima eğri bir şekilde ilerlediğini ortaya koymuştur. Balistik biliminin bilinmeyen kısmının açıklanır hale gelmesi Galile(1638) ile Newton'u(1723) yaptığı deneyleri beklemek gerekecekti (Uslu, 2007). Bunlardan Newton yer çekimini, Galile de hava direncinin etkisini belirlemiştir. Bir merminin yörüngesi havada boşluk halinde iken dikey eksenli bir parabol çizebilir, ancak havanın direnci bu eğriyi değişikliğe uğratmaktadır. Bu değişikliğe sebep olan şartlar merminin hızına, çapına, ağırlığına, biçimine bağlıdır ve "balistik" adı verilen bir çeşit katsayıya bağlıdır. Öte yandan mermiyi kendi yörüngesine teğet tutmak için namlu içindeki yivler sayesinde merminin kendi ekseni etrafında dönmesi sağlanır. Bu, merminin ilk atış eksenindeki yüzeye oranla

sapma yapacağı gibi, mermiye yörüngesinde "devinme olayı" ve "üğrüm" adları verilen özel hareketler yaptırır (Uslu, 2007).

1742' de İngiliz Robbins tarafından balistik sarkacın ortaya konulması sayesinde, mermilerin yörüngelerindeki hızları ölçülebilir hale gelmiştir. Balistik bilimine deneysel bir nitelik kazandırılmıştır (Uslu, 2007)

Mermilerin ve patlamayla hız kazanmış parçaların hedefte yaptığı etki ile hedef (terminal) balistiği ilgilenir. Genelde kriminal olaylar çerçevesinde değerlendirilen bir daldır.

Namluyu terk eden merminin çekirdeğine etkide bulunan dış etkenler:

Yer çekimi:

Ateşlenen kurşun namluyu terk ettiği anda yer çekimi gücünün etkisine girmektedir. Buna göre kurşun, tamamen yatay atış yapılan bir namludan çıktıktan sonra bir yay çizerek yere ulaştığı an ile aynı yükseklikten bırakılan tamamen aynı bir ayçiçek çekirdeği ile eş zamanda yere ulaşır. Kurşunun yatay olan süratinin, dikey olan bu serbest düşüşe hiç bir etkisi yoktur. Yatay hızlanma ve serbest düşüş birbirinden bağımsız etkenlerdir. Aynı fiziksel özelliklere sahip seri bir yivli tüfek mermisi ile yivsiz mermi veya sapan taşı, atıldıkları merkezden uzaklıkları farklı olmak üzere aynı anda yere düşerler (Uslu, 2007).

Sürtünme:

Namluyu terk eden merminin çekirdeği etkide bulunan bir diğer etken ise havanın sürtünme kuvvetinin etkisidir. Havanın sürtünmesi mermi çekirdeğine etkisi namludan çıkınca başlar ve merminin hızını yavaşlatır. Kurşun yer çekiminden dolayı bir süre sonrasında yere düşeceğinden kurşunun yere düşene kadar gecen sürede en uzak mesafede yere düşmesi istenmektedir. Bunun için tek çözüm hızın artmasıdır. Günümüzdeki teknolojik gelişmeler ile bu hız ses hızının 2-3 katı oranında tasarlanmakta ve imal edilmektedir (Uslu, 2007).

Bu iki etkinin yanı sıra "ikincil etkenler" diyebileceğimiz, rüzgar ve hava şartları, çekirdeğin ve namlunun fiziksel durumu da çekirdeğin namludan ayrıldıktan sonra farklı yörüngeler çizerek ilerlemesine sebep olmaktadır.
Söz konusu fiziksel kurallar ve etki etmenleri çerçevesince oluşturulan uçuş eğrileri namluyu terk eden çekirdeğin istenilen hedefle ulaşmasında başlıca etkenler olarak rol almaktadırlar (Uslu, 2007).

Günümüzde, balistik çalışmaların birçoğu askeri zırhlar alanında kurşun, füze, mühimmatta, nükleer reaktörlerin veya jet motorundan kopan parçalarına karşı koruyucu tabakalar olarak kullanılan malzemelerin insan bünyesine zarar vermesine karşı yapılır. Kurşun, füze, şarapnellerin... uçakların yapısındaki ince alüminyum sac bloğuna çarpması üzerine yapılan çalışmalar daha yeni gelişmelerdir. Bu konuda AGARD ve NATO bünyesinde çalışmalar bilinmektedir. Ülkemiz de birçok alanda balistik koruma üzerine çalışmalar mevcuttur bunlara örnek verecek olursak Altay tankının dışına yerleştirilmiş olan bor karbür içerikli zırhlardır (Uslu, 2007).

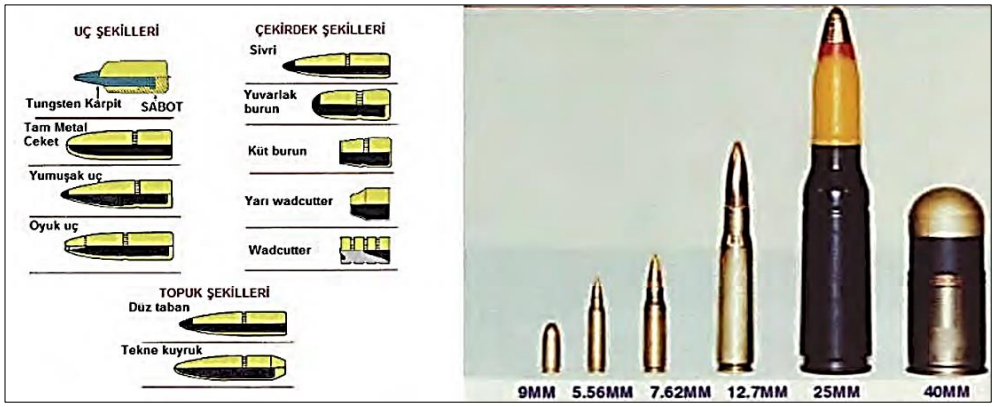
Balistik koruma amacında yüksek hızdaki çarpmanın etkisiyle oluşacak olan darbenin en aza indirilmesi planlanıp ve merminin vücuda temasının engellemeyi ya da en az seviyede tutmayı amaçlanmaktadır. Darbenin en aza indirilme amacı ile birlikte vücutta gerçekleşen çöküntü miktarının da minimumda kalması ve vücut dokularının zarara uğramaması hedeflenmektedir. Çöküntü miktarının minimum olabilmesi ise, darbe sırasında oluşmuş olan enerjinin geniş bir alana yayılarak enerjinin sönümlenmesi ile sağlanmaktadır. Balistik amaçlı zırhta meydana gelen darbenin etkisinin analiz edilebilmesi için darbe olayı incelenmiştir. Merminin malzemeye çarpması ile birlikte enerjinin darbe noktasından başlayıp ulaştığı en geniş çapta yayıldığı görülmüştür (Çerkez, 2007). Bu gelişmeler doğrultusunda bazı balistik standartlar geliştirilmiş olup bu standartlar tezin ilerleyen kısımlarında açıklanmıştır.

2.2.Balistik Koruma Standartları

Dünyada balistik koruyuculuğu sınıflandırmak için birçok standart bulunmaktadır. Yaygın olarak kullanılan NIJ (The US National Institute of Justice) ve HOSDB (UK Home Office Scientific Development Branch) tarafından kabul edilen standartlardır (Bozdoğan ve ark., 2015) . Dünyada ve ülkemizde kullanılan standartlar Tablo 2.1.' de verilmiştir. Bu standartlara konu edinmiş olan mermiler ve çeşitleri hakkında bazı özellikleri Şekil 2.3.' de gösterilmiştir.

Tablo 2.1. Balistik koruyucular için kullanılan standartlar (www.globalsecurity.org, 2019)

Standart No	**Standart Adı**
TS 11164	Balistik koruyucu vücut zırhı
TS 13349	Askerî zırhlar - V_{50} balistik hız deneyi
MIL-A-46103 C	Light Weight, Ceramic Faced Composite Armor Procedure Requirements
MIL-B-44053 A	Fragmentation Protective Body Armor, Vest Ground Trops
MIL-STD-662 F	Balistic Test For Armor
NIJ-STD-0101.04	Balistic Resistance Of Personel Body Armor
NIJ-STD-0101.06	Balistic Resistance Of Personel Body Armor
NIJ-STD-0108.04	Balistic Resistance Of Protective Materials
STANAG 2920	Balistic Test Method For Personel Armor
UK/SC/4697	The Balistic Testing Of Fragment Protective Personnel Armors
PPAA STD-1989-05	Personel Protective Armor Assosiation Testing Standarts For Balistic Resistance Of Presonel Body Armors
UL 752	Balistic Resistance Equipment
MIL-B-44194 A	Body Armor Fragmentation Protective Undergarment C.V. Crevmens
MIL-P-46199	Aluminium Oxide Ceramic (For Use İn Armor Composite)
Pr EN ISO 14876-2	Protective Clothing-Body Armor-Part-2: Bullet Resistance Requirements And Methods



Şekil 2.3. a) Mermi tipleri b) Değişik kalibreye sahip mermiler (www.globalsecurity.org, 2019)

Türk Standartları Enstitüsünde yer alan TS 11164 nolu ve TS 13349 nolu standartlar, ateşli silahlara karşı kişisel vücut zırhlarının balistik koruması için deney yöntemlerini kapsamaktadır (Bozdoğan ve ark., 2015). Ancak bunlara ek olarak yaygın olarak kullanılan NIJ (National Institute of Justice) standardında belirtildiği üzere günümüz koşullarında hafif silahlara karşı koruyucu zırhlar için geliştirilmiş olan malzemelerin balistik açıdan performanslarının değerlendirilmesi için referans olarak kullanılmaktadır.

NIJ-STD-0101.04 ve NIJ-STD-0101.06 standartları yaygın kullanılan standartlar sistemleri olup, bu standartlara göre kullanılacak malzemenin hangi koruma seviyesi içerisinde test edileceği ve ne kadar koruma sağlayacağı gibi detaylara yer verilmektedir (Cerit, 2004; Bozdoğan ve ark., 2015; NIJ-STD-0101.04, 2002; NIJ Standard-01.01.06,2008).

NIJ-STD-0101.04 standardı balistik amaçlı olarak insan vücudunu ateşli silahlara karşı asgari koruma seviyelerini ve kişisel koruma zırhlarının balistik performanslarını belirlemek için uygulanacak test koşullarını açıklamaktadır. Balistik amaçlı koruyucu malzemeler, NIJ-STD-0101.04 Standardında farklı özellikli ve ağırlıkta farklı hızlarda kullanılan mermilerin darbe etkisine dayanıklı altı ayrı koruma seviyesi içeresinde sınıflandırılması yapılmıştır. Bu koruma

seviyeleri Tablo 2.2.' de verilmiştir (Cerit, 2004; Bozdoğan ve ark., 2015; NIJ-STD-0101.04, 2002; NIJ Standard-01.01.06, 2008).

Tablo 2.2. NIJ-STD-0101.04 standardı koruma seviyeleri (Bozdoğan ve ark., 2015)

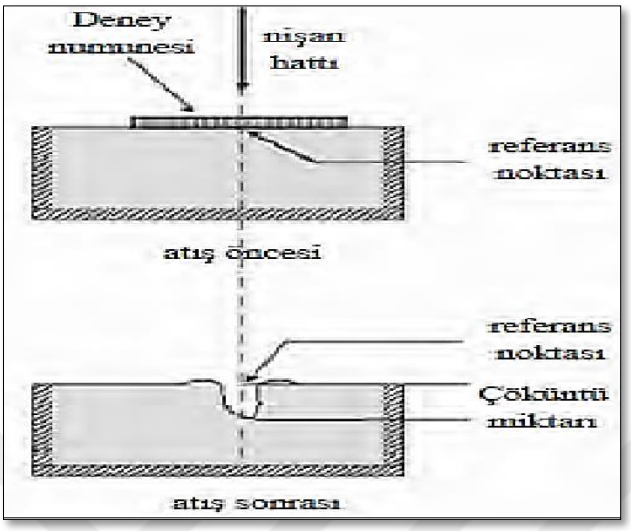
KORUMA SEVİYESİ	KALİBRE VE MERMİ TİPİ	MERMİ AĞIRLIĞI (g)	MERMİ HIZI (m/s)	TRANVA DERİNLİĞİ (max mm)
I (5m mesafe)	22 LR uzun namlu kurşun burunlu mermiler (LR, LRN)	2,6	320	44mm
	380 ACP Tam metal kaplama burunlu mermiler (FMJ RN)	6,2	312	
IIA (5m mesafe)	9 mm Tam metal kaplama yuvarlak uç mermi (FMJ RN)	8,0	332	44 mm
	40 S&W Tam metal kaplama burunlu mermi (FMJ)	11,7	312	
II (5m mesafe)	9 mm Tam metal kaplı yuvarlak uç mermi (FMJ RN)	8,0	358	44 mm
	357 Magnum, metal kaplı yumuşak uçlu mermi (JSP)	10,2	427	
IIIA (5m mesafe)	9 mm Tam metal kaplama yuvarlak uç mermi (FMJ RN)	8,0	427	44 mm
	44 Magnum Kaplama çukur (özel içine göçük uç) nokta mermi (JHP)	15,6	427	
III (15m mesafe)	7,62 mm Tam metal kaplama mermiler (FMJ)	9,6	838	44 mm
IV (15m mesafe)	30 mm zırh delici (AP) Mermi	10,8	869	44 mm

Vücut zırhlarının balistik amaçlı etki eden kurşun hızlarının belirlenmesi testlerinde P-BFS (the Perforation and Backface Signature Test) ve balistik limit

hız (V_{50}) testleri kullanılmaktadır. Bu testler koruma seviyesi IIA, II, ve IIIA dikkate alınarak 2 mermi ile gerçekleştirilmektedir (Chen ve ark., 2012).

NIJ-0101.04 ve NIJ-0101.06 standartlarına göre testi yapılacak malzemelerin destek malzemeleri (örneğin kompozit zırh tabakaları ve insan beynini simüle etmek amacıyla kullanılan cam macun (Şekil 2.4.)) testlerin öncesinde 24 saat süreyle 23±2°C'de nüfus edilmesi gerekmektedir. Oluşacak deformasyonun değerinin belirlenmesinin yapılabilmesi amacıyla darbenin geldiği yerin arka tarafına gelecek şekilde balistik zırh malzemesinin arka yüzüne cam macunu konulmalıdır. Deney düzeneğine göre atıştan sonra mermi çekirdeğinin insan vücudunda yapabileceği çöküntü miktarının ölçümünün yapılabilmesi için kil, cam macunu veya benzeri bir destek malzemesi kullanılmaktadır. Kullanılacak olan destek malzemesi 29ºC'nin üzerinde bir sıcaklıkta en az 3 saat süre ile bekletilmektedir. 1043±5 gram ağırlığında, 63,5±0,05 mm çapında çelik bilye 2 metre yükseklikten, kenarlardan 6±3 mm içeriden ve merkezler arası 203±25 mm olacak biçimde macunun üzerine serbest düşme hareketi ile düşmeye bırakılmaktadır. Bu işlemde toplamda 5 adet serbest düşme hareketi yapılmakta ve oluşan çukurların derinliklerinin aritmetik ortalaması alınmaktadır. Aritmetik ortalama 20±3 mm olduğu zaman destek malzemesinin teste hazır olduğu anlaşılmaktadır (Bozdoğan ve ark., 2015; NIJ-STD-0101.04,2002).

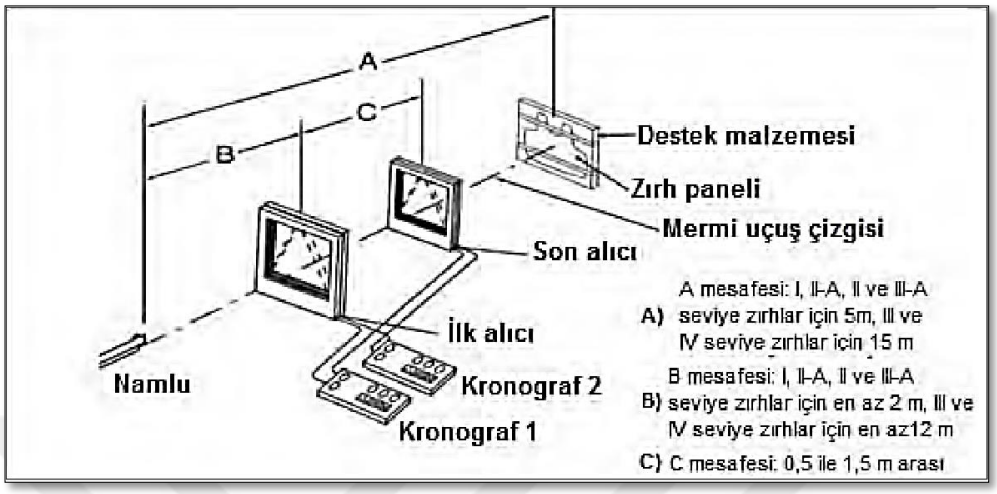
Ürünlerin ön ve arka yüzeyleri arasındaki performans farklılığı ile sudan etkilenebilme olasılıkları göz önüne alınarak ıslak-kuru ve ön-arka yüzeyler için testlerin ayrı şekilde yapılması gerekmektedir. Islak testte yelekler 10-20°C ve 100±20 mm/sa hızla akan su ile 3 dakika süreyle maruz kalacak şekilde her iki yüzü için ayrı ayrı gerçekleştirilmektedir. Islatılan zırhlar daha sonra 10-30 dakika arasında atış testine tabi tutulmakta olduğu tanımlanmıştır (Bozdoğan ve ark., 2015: Temiz, 2005' den)



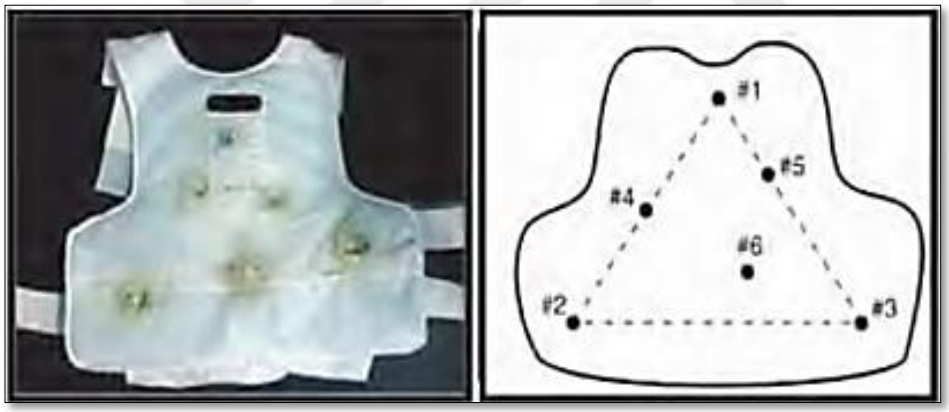
Şekil 2.4. Balistik test esnasında insan tenini simüle eden ve hedef zırh arkasına yerleştirilen şartlandırılmış dolgu maddesi (Yılmaz, 2012)

Numune hazırlık aşamasında destek malzemesinin yeleklere tam olarak temas etmesi ve arada boşluklar kalmayacak şekilde olması gerekmektedir. Atışlar gerçekleştirilirken istenilen koruma seviyesine göre hedef, ilk alıcı ve son alıcı arasındaki mesafeler değiştirilerek ayarlanmaktadır. Şekil 2.5.' de bu verilen sistem görsel olarak anlatılmaktadır (NIJ-STD-0101.04, 2002; NIJ Standard-01.01.06, 2008)

Koruma seviyesi I, II-A, II ve III-A olan zırhlar için namlu ile hedef arasındaki mesafe 5m, III ve IV seviye zırhlar için ise 15 m olarak belirlenmiştir. İstenilen koruma seviyesine ve kullanılacak yönteme göre Şekil 2.6' da belirtilmiş olan işaretli noktalara atışlar yapılmaktadır (NIJ-STD-0101.04, 2002; NIJ Standard-01.01.06, 2008).



Şekil 2.5. NIJ Standartı vücut koruyucu zırhlar için test düzeneği (Bozdoğan ve ark., 2015)



Şekil 2.6. Test için merminin atışlarının yapılacağı yerler (Rice, 2011)

Hedef malzemede delinme olup olmadığına ve destek malzemesinde oluşan çöküntünün büyüklüğünün ölçülmesiyle değerlendirmeler yapılmaktadır. Mermiye karşı balistik dayanım kriterinin ölçütün NIJ-0101.04 standardında, zırh malzemesinin arka yüzeyine yerleştirilen ve insanı tenini simüle eden macunda meydana gelen çöküntünün maksimum 44 mm ve alt değerlerde olması gerekmektedir tablo (Bozdoğan ve ark. 2015; NIJ-STD-0101.04, 2002).

2000 yılında balistik vücut zırhlarının dayanımı üzerine yayınlanan NIJ-0101.04 standardının bazı kısımlarında yapılan değişiklikler ve Temmuz 2008'de vücut zırhlarında balistik dayanım NIJ-0101.06 standardı olarak güncellenmiştir (Tablo 2.3) (Bozdoğan ve ark. 2015; NIJ-STD-0101.04, 2002; NIJ Standard-01.01.06, 2008).

Tablo 2.3. NIJ-STD-0101.06 standardında belirtilen balistik koruyucular için koruma seviyeleri (NIJ Standard-01.01.06, 2008)

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

Bu bahsedilen standart ve koruma türlerine göre özel ihtiyaçlar için de özel tip koruma seviyeleri geliştirilmiştir. Özel kullanım için ihtiyaç duyulduğunda tam test atışları ve kullanılabilecek asgari referans etki hız parametrelerine bakılarak testler uygulanmalıdır. Tablo 2.3' de bu standart seviyelerinde kullanılan

mermilerin standarttaki özellikleri verilmiştir. (NIJ-STD-0101.04, 2002; NIJ Standard-01.01.06, 2008).

2.3. Balistik Korumayı Belirleyen Testler

Balistik koruma için geliştirilen malzemelerin ne kadar koruma sağladıklarını tespit edebilmek için bazı testler vardır. Bu testlerden en çok kullanılanları balistik limit V_{50} ve stanag 2920 testleridir.

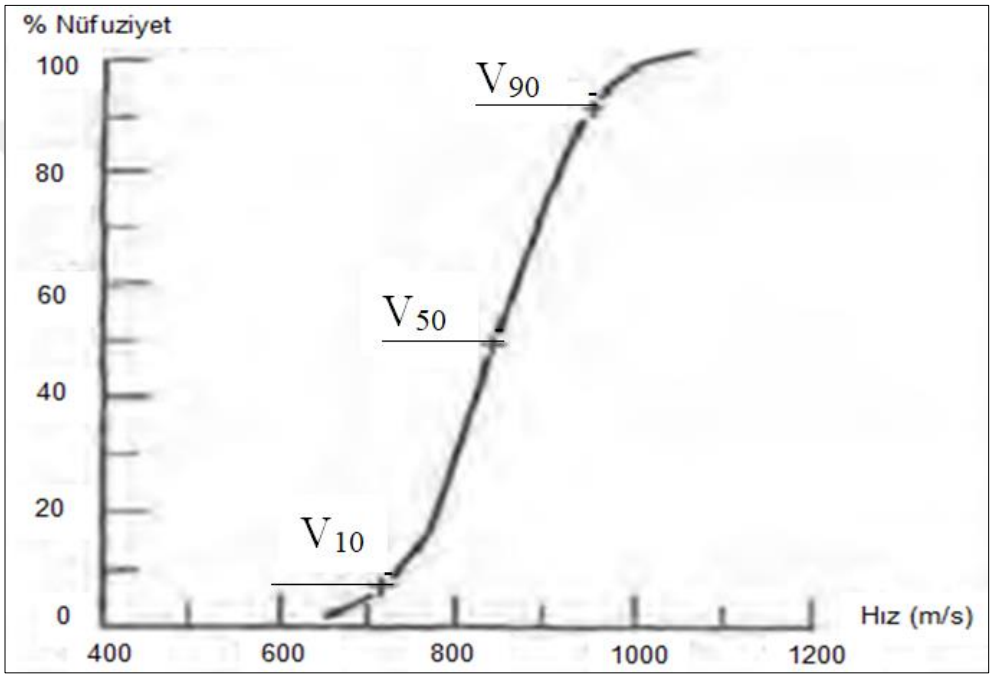
2.3.1.Balistik Limit V_{50} Testi

Balistik olaylarda da karşılaşılacak problemden birisi de bir cismin hasara uğramadan dayanabileceği mermi hızının tespitidir. Bu hızların tespitine "balistik çarpma hızı" veya "balistik limit" adı verilmektedir (Cerit, 2004). Kritik hız değeri V_{50}, parçacığın hedefe dik konumda çarpması sonucu hedefin %50 delinme veya delinmeme ihtimalini gösteren hız olarak tanımlanmaktadır (Cerit, 2004; Erdem ve Türker, 2011). Bu durumda parçacık V_{50} limiti hızında ise zırh plakasının delinme ihtimali %50'dir. V_{50} değerinden düşük hızlar malzemede kısmi delinme meydana getirirken, bu değerden yüksek hızlar malzemede tam delinme meydana getirmektedir (Erdem ve Türker, 2011).

Tam delinme (tam penetrasyon); kullanılan balistik amaçlı zırh malzemesinin mermi veya kullanılan mühimmat malzemesinden kopan parçacıklar tarafından tamamen delinmesidir. Kısmi delinme (kısmi penetrasyon) ise kullanılan plaka boyunca delinmenin gerçekleşmemiş olması durumudur (Aly ve Li, 2008).

V_{50} hızını belirleyebilmek için zırh malzemesine minimum dört atış yapılması gerekmektedir ve değerlendirmesi yapılacak olan en az dört atıştan, ikisinin zırhı delerken, diğer ikisinin de delmeyecek hız değerlerinde bulunması gerekmektedir. Ayrıca, bu dört farklı hız değerleri arasında, zırhı en yüksek hızda delen merminin çarpma hızı ile zırhı delemeyen en düşük hızdaki merminin çarpma hızı aralarındaki hız farkının 18,29 m/s değerini geçmemesi şartı bulunmaktadır. Test

sonucu olarak, dört atıştaki mermi çarpma hızlarının aritmetik ortalaması alınmaktadır. Çıkan hız ise zırh plakasının V_{50} balistik hız sınırı değerini vermektedir (Erdem ve Türker, 2011). Şekil 2.7.' de V_{50} hız testinin örneği yer almaktadır. V_{50} değeri, kullanılan malzemenin sertliği ile lineer ilişki göstermektedir (Aly ve Li, 2008).



Şekil 2.7. V_{50} hız limit testi gösterim şekli örneği (Aly ve Li, 2008).

2.3.2. Stanag 2920 testi

Stanag 2920 standardı ise, NATO Standartlaştırma Anlaşması çerçevesinde geliştirilmiş koruyucu personel zırhlar için balistik amaçlı test metotlarında açıklanmaktadır. Testler sırasında kullanılacak olan merminin tek çeşit mermi olması, koruyucuların birbirleriyle karşılaştırılması da mümkün olabilmektedir. US-MIL-P-46593'te tanımlanan parçalanma taklit edici parçacıklar (Fragment Simulating Projectiles) (Şekil 2.8.) serisinden biri kullanılmaktadır. Genellikle 5,385 kalibrelik, 1,102 gramlık mermiler tercih edilmektedir. Test edilecek

numunenin test öncesinde, 20±2ºC ve %65±5 bağıl nem içeren ortamda bulundurulması gerekmektedir. Test sırasında, balistik koruyucu malzemeye en az 6 mermi atılmakta ve bunların hızları ölçülmektedir (Bozdoğan ve ark., 2015: Temiz, 2005'den)

Balistik koruyucu malzemenin normalinden 5º'den daha fazla sapan mermiler balistik hız sınırının hesaplanmasında kullanılmamaktadır. Her bir atış, atış yapılmış noktalar veya deformasyonun oluştuğu noktalardan en az 30 mm uzaklıkta olmalıdır. Hedeften tamamıyla geçen veya hedefin arkasında yırtılmaya neden olan mermiler balistik koruyucu yapıyı tamamıyla delmiş sayılmaktadır (Bozdoğan ve ark., 2015: Temiz, 2005'den).Bu standartta, aşağı ve yukarı hız metodu (up and down method) kullanılarak mermi atış hızları ayarlanmaktadır. İlk mermiye zırhın V_{50} balistik hız sınırı değerinde hız kazandırılmaktadır. İlk mermi zırh yüzeyinde tamamen delme oluşturursa, ikinci mermi ilk mermiye göre 30 m/s daha az hızlı olacak şekilde atılmaktadır. İlk mermi zırh yüzeyinde kısmi delme oluşturursa, ikinci mermi ilk mermiye göre 30 m/s daha fazla hızlı olacak şekilde atılmaktadır. Balistik zırhı delen ilk atışlar tamamlandıktan sonra, atışlar mermi hızları 15 m/s aşağı ya da yukarı büyüklükte olacak şekilde gerçekleştirilmektedir. V_{50} balistik sınır hızı elde etmek için standartta yer alan prosedüre göre ateş etmeye devam edilmektedir Belirli bir sayıdaki atıştan sonra, sonuçların 3 tanesi kısmi delinmenin gerçekleştiği en yüksek hızlardan, diğer 3 tanesi ise tamamıyla delinmenin gerçekleştiği en düşük hızlardan olmak üzere toplam altı hız değeri hesaplamaya alınmaktadır. Kısmi delinmenin ve tam delinmenin gerçekleştiği gruplarda tespit edilen en yüksek ve düşük hız değerleri arasındaki farkın ise en fazla 40 m/s olması gerekmektedir. Alınan düzgün çarpmalardan ortalama değer bulunarak V_{50} balistik sınır hızı hesaplanmaktadır (Bozdoğan ve ark., 2015: Temiz, 2005' den).



Şekil 2.8. US-MIL-P-46593'te tanımlanan parçalamayı taklit edici parçacıklar (Fragment Simulating Projectiles) (www. bodyarmornews.com, 2019).

2.4.Balistik Koruma Amaçlı Kullanılan Tekstil Malzemelerinde Enerji Emilimi

Balistik etkilere karşı koruma amaçlı giysiler, mermilerin ve şarapnel parçalarının kinetik enerjilerini absorbe ederek vücuda zarar vermelerini engellemekte yada azaltmaktadır (Çay ve ark., 2007; www.acarerugur.com, 2019). Balistik yelekler, vücudu koruma amaçlı zırhlar ve kasklar, insan vücudunu yüksek hızlı darbeler sırasında oluşabilecek yaralanmalara karşı korumak amacıyla tasarlanmış malzemelerdir (Turan, 2007). Ancak bu malzeme ihtiyacının yanı sıra gelişen teknolojiyle beraber daha önceleri pek gereksinimi olmayan koruyucu giysilere çağımızda çok fazla ihtiyaç duyulmaya başlanmıştır. Teknik tekstil malzemeleri arasında yer almakta olan balistik koruyucu tekstil malzemelerinin üretiminde en etkili olan parametreler düşük maliyet, hafiflik ve konforun ön plan da olması ve sentetik liflerin bu ihtiyaçları karşılaması sebebiyle yeni lif çeşitleri geliştirilmeye başlamıştır. Bu amaç doğrultusunda yüksek mukavemet, yüksek modül ve düşük elastisitede olan yüksek performansa sahip lifler ve tekstil malzemeleri geliştirilmiştir (Karakan, 2009).

Balistik kumaşların üretiminde aramid (Kevlar®, Twaron®, Technora®), yüksek-molekül-ağırlıklı polietilen (Spectra®,, Dyneema®,), Poli p-fenilen-2,6-benzobisoksazol (PBO)(Zylon®), Polypyridobisimidazole (PIPD) (M5® olarak da bilinmektedir) gibi yüksek mukavemetli lifler, bu amaçla kullanılan yüksek performanslı balistik koruma amaçlı liflere birer örnek teşkil etmektelerdir. Balistik

koruma amacında üretilecek tekstil ürünü kısa mesafe içinde mermileri durdurması planlandığı için kullanılacak liflerin çok yüksek dayanımlı ve düşük elastisiyette olması beklenmektedir (Çay ve ark. 2007; Çerkez, 2007).

Balistik kumaş üretimi için kullanılan iplikler tek başına kullanıldıklarında darbeyi absorbe etmekte yeterli korumayı sağlamamaktadır. Ancak bu ipliklerin dokunması ile elde edilen balistik amaçlı kumaşın mukavemeti, kumaşı meydana getiren ipliklerin toplam mukavemetinden daha büyük değerlere, hatta mukavemet-ağırlık yönünden de çelikten malzemeden dahi yüksek değerlere ulaşmaktadır. Bu değerler kumaşın dokuma şekline, modellenmesine, yapısına, ipin kıvrım şekline ve kumaşın enerji absorbe etme mekanizmalarına bağlı olarak değişiklikler göstermektedir (Işık ve ark. 2013).

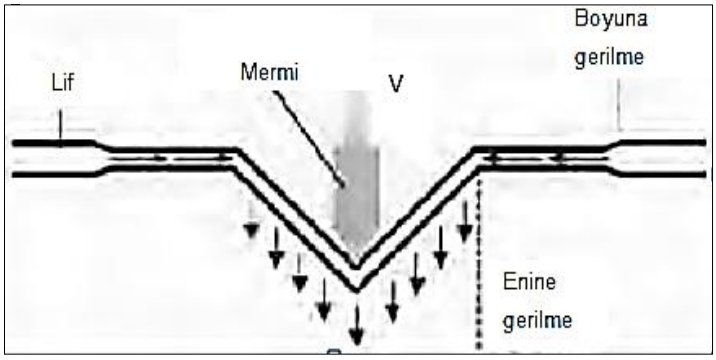
Balistik korumada lifler, dokuma kumaş veya dokusuz yüzey yapılar olarak da kullanılmaktadır (Bozdoğan ve ark., 2015; Cheeseman ve Bogetti, 2003). Dokuma kumaşların genel olarak bezayağı ve panama dokuma şekli tercih edilmektedir. Bu amaçlı uygulamalarda, büyük önem arzeden parametre ise "örtme faktörü" nün 0,6 ile 0,95 arasında yer alması istenmektedir. Örtme faktörü 0,95' den büyük olması halinde, iplikler dokuma işlemi esnasında bozulmakta; 0,6'dan küçük olması durumunda ise kumaş yapısı beklenenden çok gevşek bir yapıda olmaktadır (Cheeseman ve Bogetti, 2003). Literatürde yapılmış çalışmalar incelendiğinde ise gevşek dokunmaya sahip ve dokuma desenleri düzensiz dağılım gösteren kumaşlarda mermi enerjisinin kumaşa geçmediği, ipliklerin bibirlerinin üzerinden kaydığı ve iplikler arasında meydana gelen boşluklardan merminin bu bölgeden geçtiği tespit edilmiştir. Bu sebeple de bu tür balistik amaçlı kumaş malzemelerin balistik dayanımı düştüğü tanımlanmıştır. (Bozdoğan ve ark., 2015: Temiz, 2005' den).

Kısa kesikli liflerden üretilen dokusuz yüzeyler de, liflerin kesişme noktaları daha az olduğundan, liflerin serbest hareket etmelerinden dolayı dokusuz yüzeylerde enerji absorbe etme yetenekleri daha azdır. Tek yönlü tabakalarda ve dokuma kumaşlarda, merminin kazandığı enerjinin büyük kısmı darbe esnasında

darbe alanında bulunan liflerin gerilimi sebebiyle kopması için kullanılmaktadır. Bunun sebebi de dokuma kumaş da bulunan iplikler ve liflerin kesişim yerlerinin fazla olması ve dolayısı ile balistik nedenli darbeye maruz kalan serbest olmayan lifler maksimum seviyede uzamakta ve kopmaktadır (Çay ve ark., 2007).

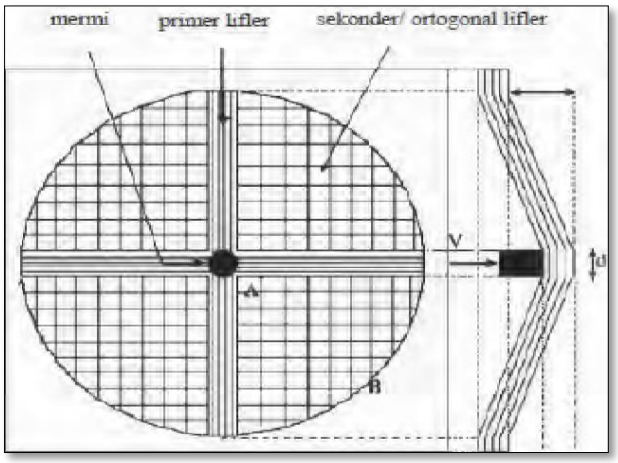
Balistik koruyucu malzemeler, sert ve yumuşak yapılı koruyucu malzemeler olmak üzere ikiye ayrılmaktadırlar. Cam, seramik ve metalden yapılan malzemeler sert koruyuculardır. Yumuşak koruyucular, kumaş ve benzeri yapılardan yapılmış olan polimer esaslı malzemelerden oluşmuş ürünlerdir (Bozdoğan ve ark., 2015: Temiz, 2005'den).

Balistik koruma ile merminin ya da şarapnel parçasının yüksek hızdaki çarpma etkisinde oluşacak darbenin etkisini en aza indirilmesi ve merminin vücuda temasının önlenmesi planlanmaktadır. Oluşacak darbenin en aza indirilmesiyle birlikte vücutta oluşacak çöküntü değerinin de minimumda kalabilmesi ve vücut dokularına zarar vermesini engellemek hedeflenmektedir. Çöküntünün büyüklüğünü minimumda tutulabilmesi ise, merminin çarpması ile darbe sırasında oluşacak enerjinin geniş bir alana yayılması ile sağlanmaktadır. Kumaşta oluşan darbe analizinin yapılabilmesi için tek bir lifte gerçekleşmekte olan darbe olayı göz önüne alınmıştır. Merminin life teması ile birlikte iki çeşit dalga halinde enine ve boyuna dalga olmak üzere Şekil 2.9.' da ki gibi darbe noktasından yayıldığı görülmüştür. Boyuna çekme dalgası malzemenin ses hızında lif ekseni boyunca hareket etmektedir. Çekme dalgası darbe noktasından yayıldıkça, çarpan merminin hareket doğrultusunda eğilen materyal darbe noktasına doğru akmaktadır. Malzeme hızından daha düşük bir hızda yayılan bu enine yönde olan hareket ise enine dalga olarak adlandırılmaktadır (Çerkez,2007).



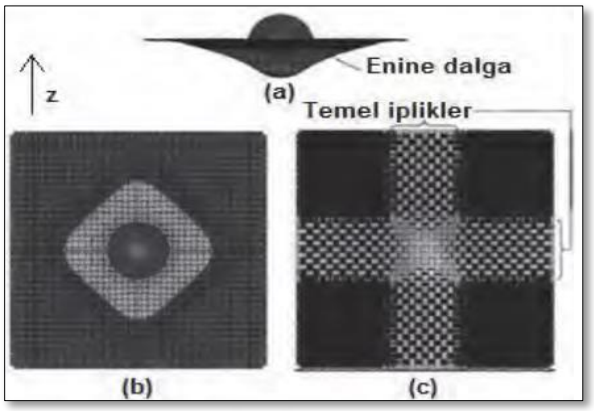
Şekil 2.9. Merminin life temasının simülasyonu (Bozdoğan ve ark. 2015)

Merminin çarpma anında, darbenin oluştuğu yerden başlayan ve mermi çekirdeğinin hızına bağlı değişiklik gösteren ani şok dalgası oluşmaktadır. Mermi çekirdeğinin enerjisinin büyük bir kısmı, şekil değiştirme ve kinetik enerji olarak doğrudan temas eden liflere geçmekte ve bu liflere primer lif adı verilmektedir. Şok dalgasının kumaş yüzeyinde etkisiyle dokuma yüzey yapısında yüksek çekme gerilmesi, şekil değiştirmesi ve hasara uğrayan primer lifl önemli miktarda merminin enerjisini absorbe etmektedirler. Sekonder (ortogonal) lifler ise mermi ile doğrudan temas etmeyen liflerdir. Şekil 2.10.' da primer ve sekonder lifler gösterilmektedir (Naik ve ark., 2006).



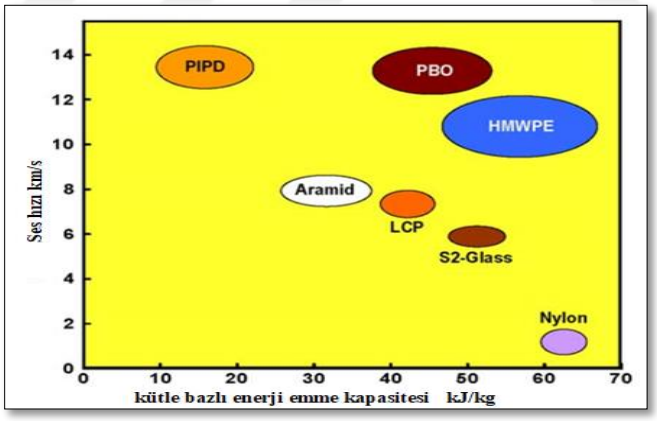
Şekil 2.10. Primer ve sekonder lifler (Naik ve ark., 2006)

Tek katmanlı bir dokuma kumaş yapısının darbe etkisi altında deformasyonun incelenmesi, kumaşın balistik amaçlı performansını etkileyen fiziksel mekanizmaların anlaşılması ve incelenmesine yardımcı olmaktadır. Tek kat kumaşın enine doğrultuda darbeye maruz kalması ile beraber, tek lifin darbe maruziyetine benzer durumda, mermi çekirdeği ile temas halindeki temel ipliklerin enine doğrultuda bir eğilme hareketi oluşmakta ve temel (primer) iplikler ile kesişen sekonder (ortogonal) ipliklerin temel (primer) iplikler tarafından orijinal kumaş düzleminden dışarıya doğru çekilmesine sebebiyet vermektedir. Ortogonal (sekonder) iplikler de bozulmakta ve temel (primer) ipliklerde olduğu gibi gerinim dalgası geliştirmektedirler. Aynı durumda bu ortogonal iplikler kendisi ile kesişimde olan iplikleri zorlamaktadırlar. Bu ipliklerin birbirleriyle sürtünmelerinden dolayı, darbenin meydana geldiği noktada enine yönde bir eğilme hareketi ortogonal (sekonder) ipliklerin düzensizliği olarak meydana getirmektedir. Bu noktada eğilme, zorlanmanın en yüksek değere ulaştığı ana kadar devam etmektedir. Yapılan analizler sonucunda, merminin kinetik enerjisinin büyük kısmını zorlanma ve kinetik enerji olarak temel ipliklere transfer edildiği ve ortogonal (sekonder) ipliklerin enerji absorbsiyonuna olan katkılarının ise oldukça az olduğu tespit edilmiştir. Şekil 2.11’ de görüldüğü üzere temel iplikler gerilmiş durumdalar; ortogonal iplikler ise daha gevşek bir durumdalar (Cheeseman ve Bogetti, 2003).



Şekil 2.11. Tek katmanlı kumaşta darbenin meydana getirdiği gerilimler (a) yandan, (b) üstten ve (c) alttan görünüşü (Cheeseman ve Bogetti, 2003).

Balistik koruma amacıyla kullanılan lifin enerji absorbe edebilme yeteneği oldukça önemlidir. Şekil 2.12' de balistik amaçla kullanılan farklı lif çeşitlerinin dalga hızı-enerji sönümleme indeksi grafiği verilmiştir (Grujicic ve ark. 2009).



Şekil 2.12. Çeşitli balistik liflerin dalga hızı - enerji sönümleme kapasitesi grafiği (Grujicic ve ark. 2009).

Mermiden hedef malzemeye geçen enerji miktarını etkileyen temel etkenler kompozit malzeme bakımından; takviye malzemesinin fiziksel özellikleri, yapısı, cinsi, matris cinsi, sürtünme katsayısı, tabaka sayısı ve kalınlık olarak incelenirken

mermi yönünden ise; ucunun geometrisi, hız, mermi çekirdeğinin malzeme cinsi, sertliği ve merminin kütlesi olarak incelenmiştir (Hazell ve Appleby, 2009).

Mermi çekirdeğinin zırhı delip geçtiği durumlarda absorbe edilen enerji miktarı, mermi çekirdeğinin çarpma enerjisinden zırhı delip geçtiği zamanda sahip olduğu enerji çıkartılarak elde edilmektedir. Balistik limit hızının altındaki darbeler için ise merminin çarpma enerjisi, doğrudan zırhın absorbe ettiği enerjiye eşittir (Özer, 2004).

Balistik limit hızının üzerindeki hızlar için absorbe edilen enerji;

$$E = \frac{1}{2} m (Vi^2 - Vr^2) \quad (2.1)$$

Balistik limit hızının altındaki hızlar için absorbe edilen enerji;

$$E = \frac{1}{2} m V^2 \quad (2.2)$$

Burada; E: Zırhın sönümlediği enerji, m: Merminin kütlesi, Vi: Merminin çarpma hızı, Vr: Merminin zırhı terk ettiği andaki hızdır.

Balistik korumada liflerin oluşan darbe etkisindeki enerjisini yayma hızları (V) ve Balistik Koruma Kapasitesi (BKK) balistik performansı etkileyen önemli parametrelerdir. Yüksek mekanik özelliklere ve düşük yoğunluğa sahip olan lifler, her iki parametre bakımından en iyi balistik performans olanağı sağlamaktadır. (Çerkez, 2007)

Liflerin çarpma enerjisini yayma hızları V (m/s) ;

$$V\ (m/s) = (E/\rho)^{1/2} \quad (2.3)$$

$$V\ (m/s) = (F/\mu)^{1/2} \quad (2.4)$$

Balistik Koruma Kapasitesi (BKK) ;

$$BKK = (W * Vson)^{1/2} \quad (2.5)$$

$$W = \frac{(\sigma * \varepsilon)}{2} \quad (2.6)$$

Burada; μ: Boyca Yoğunluk (g/m), E: Modül, F: Darbe Kuvveti (N), ρ: Özgül ağırlık g/cm^3(specific gravity), σ: Kopma Mukavemeti (N), Ɛ: Kopma Uzaması (%)' dır.

Bir mermi çekirdeğinin kinetik enerjisi, hedefte oluşturacağı delme etkisine, mermi çekirdeği kütlesine, mermi çekirdeğinin enerjisine, mermi çekirdeğinin hedefe geliş açısı ile mermi çekirdeği ve zırh malzemesinin metalurjik yapısına bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Akman, 2012).

Atış sonucunda her bir yapıda tehlike tipine bağlı olarak katlarda meydana gelen bozunmalara göre sergilediği spesifik enerji absorblama (SEA) değerleri hesaplanmaktadır (Korkmaz, 2009).

Bozulan katın yoğunluğu üzerinden;

Spesifik enerji absorblama (SEA) = Tehlikenin kinetik enerjisi / Bozunan katın yoğunluğu (J.m^2/g) (2.7)

Bozunan katın yoğunluğu= (Bozunan kat sayısı x Kumaş yoğunluğu) (g/m2)(2.8)

Şeklinde hesaplanmıştır.

Her bir yapının belirtilen tehlike tiplerine maruz kalması halinde bütün yapı göz önünde bulundurularak sergilediği spesifik enerji absorblama (SEA) değerleri hesaplanmaktadır (Bozdoğan ve ark. 2015).

Yapının yoğunluğu üzerinden;

Spesifik enerji absorblama (SEA) = Tehlikenin kinetik enerjisi / Yapının toplam yoğunluğu ($J.m^2/g$) (2.9)

Balistik malzemelere yapılan atışlar sonucunda yukarıda verilen formüllerle hesaplanan spesifik enerji absorblama ve koruyucu zırhın arka yüzeyinde meydana gelen çöküntü değerleri doğrultusunda balistik koruyucunun balistik performansı hakkında yorumlar yapılmaktadır. Üreticiler malzemeyi üretirken, koruyucunun ekonomik değeri ve zırhın ağırlığını göz önünde bulundurmaları gerekmektedir. Balistik amaçlı koruyucu zırh sistemlerinde sonucu etkileyen etmenlerden biri basıncın iletilmesidir. Bu yapılarda, zırhın delinmemesi kadar çarpma anındaki oluşan darbenin dalgalarının absorbe edilmeside çok önemlidir. Mermi geometrisi, kumaşta oluşacak deformasyona etki eden önemli bir parametredir. Merminin yavaşlatılması, merminin geometrisi ile de orantılı olarak yüksek hızlardaki sivri uçlu geometriye sahip mermiden, küt uçlu geometriye sahip mermiye doğru gittikçe daha kolay olmaktadır. Küt uçlu mermiler çarpışmada daha fazla iplik yada lif ile temas etmekte ve böylece merminin enerjisini ipler ve lif yardımı ile daha çabuk etraftaki iplik ve ya liflere yaymaktadırlar. Sivri ve konik uçlu mermiler ise çarpma esnasında kumaşın içinden geçerken daha az iplikle temas ederek geçeceğin den bu mermiler kullanıldığında absorbe edilen enerjinin miktarı da daha az olmaktadır (Bozdoğan ve ark., 2015: Temiz, 2005' den).

Bunlara ek olarak kullanılacak tekstil malzemeleri lif ve kumaş olarak ve bu malzemelerden üretilmiş kompozit malzemeler olarak ayrı ayrı incelenmiştir. Lifler başta mekanik özellikleri olmak üzere çeşitli özellikleri irdelenmiştir. Bu liflerden üretilen kumaşlarda hangi dokuma şeklinin elverişli olduğu ortaya konmuştur. Bu lif ve kumaşlardan elde edilen kompozit amaçlı üretilmiş malzemeler ve literatür çalışmalarına değinilmiştir.

Tezin bu bölümünde verilen bilgiler sonucunda yapılan değerlendirmeler burada verilmiştir. Balistik; insanlığın var oluşundan günümüze ve hatta gelecekte de çok büyük öneme sahip bir sivil savunma mekanizmalarını içeren sistemdir. Bu

sistem içerisinde kıyafet olarak ya da bir personel taşıyıcı ya da savunma amacı güden malzemeleri korumak amaçlı tasarlanmış yapılardır. Bu amaçla üretilmiş balistik koruyuculara örnek verecek olursak kişisel vücut koruyucu amaçlı balistik koruyucular yumuşak vücut zırhları ve araç, yapı ya da veya malzemeleri korumak amaçlı oluşturulmuş daha büyük hasarlardan koruma sağlayan sert yapılı balistik zırhlardır. Bu balistik zırhların oluşumları geçmiş çağlarda ilk insanların hayatlarını avlanma yada dış tehlikelere karşı korumak için giydikleri kıyafetler oluştururken günümüzde ise hem dış etkenlerin olumsuz etkilerinden hem de ateşli silahların etkilerini en aza indirgemek ve personel hayatını kurtarmaya yönelik sistemler ve malzemelere bırakmıştır.

Balistik başlı başına incelenmesi gereken bir konu konumundadır. Balistik için de ele alınması gereken şeyler balistik bölümünde teferruatlı şekilde anlatılmıştır. Bu içerikler incelendiklerinde balistik için önemli bir faktörün dünyada üretilen silahlar baz alınarak hesaplanan standartlar ve bu standartlara göre üretimi sağlanan vücut ya da malzeme koruyucularının en üst düzeyde koruma sağlamasını ele almak bunun yanında ergonomi hafiflik ve bulunulan ortama uyum sağlayabilme gibi kullanılan parametrelerde bulunmaktadır. Bu parametrelerin ilk sırada ön plana çıkanları personel koruyuculuk seviyeleri ve kullanım rahatlığı (hafiflik, esneklik vb.) olmaktadır.

Balistik zırhlarda koruyuculuk seviyeleri bazı standartlarla ele alınmıştır. Bu standartlar gün geçtikçe teknolojik açıdan silah sanayisinin gelişmesinden dolayı bazı güncellemeler almaktadır. Literatüre alınmış savaş silahları ve bunlara karşı olan balistik koruyucu standartlar geliştirilmektedir. Günümüzde en güncel olarak dünya devletlerinin çoğunluğunun kabul edip uyguladığı standartlar vardır. Bunların en bilindikleri NİJ (National Institute of Justice) tarafından hazırlanmış olan standartlar bulunmaktadır. Bu standartların vücut koruyucu balistik zırh olarak en güncel olanları ise Tablo 2.3’ de verilmiş olan NIJ-STD-0101.06 standardıdır.

NIJ-STD-0101.06 standart baz alındığında silahların kullanımında ve modellerine göre kurşun ağırlığı ve kurşun hız aralıkları belirtilmiştir. Bu

standartların belirlenmesin de ve kullanılacak olan balistik vücut korucu zırhlarının hazırlanmasında bazı uygulanan tester vardır. Bu testlerin için de V_{50} limit hızı testi ve stanag 2920 testleri bulunmaktadır.

V_{50} limit hız testinde bir malzemenin maruz kalacağı mermi kütlesi ve hızı test edilmektedir. Bu test sonucunda alt sınır ile üst sınır arasında V_{50} hızını belirleyebilmek için zırh malzemesine minimum dört atış yapılmakta ve değerlendirmesi yapılacak olan en az dört atıştan, ikisinin zırhı delerken, diğer ikisinin de delmeyecek hız değerlerinde bulunması gerekmektedir. Atışlar arasından en fazla 18,29m/s hız farkı olmalıdır. Test sonucu olarak, dört atışın hızlarının aritmetik ortalaması alınır. Ulaşılan sonuç ise kullanılacak zırhın V_{50} balistik limit değerini vermektedir. Şekil 2.7' de balistik amaçlı kullanılacak zırhın V_{50} limit hız testinin örneği verilmiştir.

Stanag 2920 standardı ise; NATO Standartlaştırma Anlaşması çerçevesinde geliştirilmiş balistik koruyucu zırh amaçlı test metotları olarak açıklanmıştır. Testler sırasında kullanılacak mermiler tek çeşit olup test edilecek olan farklı malzemeler arasında karşılaştırmaya da imkan sağlamaktadır. US-MIL-P-46593'te tanımlanan parçalanma taklit edici parçacıklar (Fragment Simulating Projectiles) Şekil 2.8' de verilmiş serisinden biri kullanılmaktadır. Genellikle 5,385 kalibrelik, 1,102 gramlık mermiler tercih edilmektedir. Test edilecek numunenin test yapılmadan önce, 20±2ºC ve %65±5 bağıl nem içeren ortamda bulundurulması gerekmektedir. Balistik malzemeye uygulanacak testte koruyucu malzemeye en az 6 mermi atış yapılmakta ve bunların hızları ölçülmektedir. Balistik koruyucu malzemenin testinde normalinden 5º'den fazla olacak şekilde sapmaya uğrayan mermiler balistik hız sınırının hesaplanmasında kullanılmamaktadır. Her bir atış, atış yapılmış noktalar veya deformasyonun oluştuğu noktalardan en az 30 mm uzaklıkta olmalıdır. Hedeften tamamıyla geçen veya hedefin arkasında yırtılmaya neden olan mermiler balistik koruyucu yapıyı tamamıyla delmiş sayılmaktadır. Bu atışların 3 tanesi delinme ya da hedefe geçme hızında iken 3 tanesi ise delinme dahi sağlamadan zırh malzemesinde kalan hız değerleri alınır en düşük hız ile en yüksek

hız arasındaki hız farkı ise 40 m/sn' yi geçmemesi gerekmekte olduğu belirtilmiştir. Stanag 2920 standart olarak balistik teste kullanılacak kurşun ya da parçacığın şekli ve ağırlığı ile belirlenen hız ve zırha etki eden V_{50} limit hızı belirlenmektedir.

Bu standartlar ve testlere ek olarak elde edilen bazı veriler de bulunmaktadır sistematik olarak le alınacak olunduğunda merminin enerjisinin absorbe edilmesi, zırha verdiği hasar gibi sistemlerin ölçülmesi de enerji dönüşümleri ile incelenmesi gereken başlı başına bir konu oluşturmaktadır.

Balistik konusunda elde edilen veriler doğrultusunda gün geçtikçe ateşli ve teknolojik silahlarda geliştikçe balistik konusunda gelişmeler olacaktır ve balistik amaçlı kullanılacak zırhların standartları her gelişmeler sonunda güncellenmesi gerekecektir. Balistik konusu ve savunma mekanizmaları geçmişte olduğu gibi gelecekte de gelişmelere açık bir konu durumundadır.

3. BALİSTİK AMAÇLI KULLANILAN LİFLER

Balistik lifler; askeri ya da personel koruma amacıyla üretilen koruyucu malzemelerin birçoğu ağırlıklarından dolayı kompozit sektörüne yönelen ilgi artmaktadır. Bu alanda ise yardımcı eleman ya da takviye malzemesi olarak kullanılan genel olarak tekstil sektörünün ham maddesi olan lif çeşitleri gelmektedir. Balistikte kullanılan tekstil materyallerin başında dayanımı yüksek lifler gelmektedir ve bu liflerden elde edilmiş gerek kumaşa gerek lif veya kumaş takviyeli kompozit malzemeler vardır. Bu bölümde ise balistikte genellikle kullanılan dayanımları yüksek lifler anlatılmıştır.

3.1.Karbon Lifi

Karbon lifi çelik gibi mekanik özellikleri üstün bir liftir. Karbon lifinin tarihi 1800'lü yıllara dayanmaktadır. Karbonun çok iyi bir elektrik iletkeni olduğu bilinmesinde sonra ilk defa karbon lifi üretimi dikkat çeken bir konu olmuş ve 1879'da Edison'un lambalarında karbon liflerinin ilk kullanımı gerçekleşmiştir. Ancak gerçek anlamda ilk kullanımı 1950'lerin sonu olup, 1960'ların başından itibaren karbon lifleri ve karbon lifi takviyeli kompozitlerinin kullanımı giderek artmıştır (Çelik ve Karaşin, 2014).

Karbon ve grafit yapılarının her ikisi de ana yapıtaşı olarak karbon elementinden oluşmaktadır. Tekstildeki tanımına bakıldığında karbon lifinin oluşumundaki yapısında en az %90 oranında karbon bulunduran liftir. Öncü (precursor) olarak adlandırılan çok çeşitli hammaddelerin farklı şekillerde işlenmesi ile değişik yapılarda olan farklı morfolojili ve farklı özelliklere sahip karbon lifleri üretimi bulunmaktadır. Bir öncül malzemeden beklenen kısım ise karbon lifi yapısına dönüşümünde kolaylık sağlanabilmesi açısından, bulundurduğu karbon elementi miktarının mümkün olduğunca fazla olması gerekmektedir. Karbon liflerinin üretim şekilleri, yapısı, özellikleri ve son kullanımlarında öncül malzemeler çok önemli bir etken olmaktadır (Çelikkanat, 2002).

Karbon liflerinin günümüzdeki toplam üretim kapasitesi toplam talepten fazladır. Bu durum üreticileri alternatif pazarlar aramaya itmektedir. Karbon lifi üretiminde en önemli firma Toray Industries'dir (Çelikkanat, 2002).

Karbon lif çoğunlukla zift ve PAN denen iki malzemeden elde edilmektedir. Zift tabanlı karbon lifleri kullanılacağı yer açısından düşünüldüğünde daha düşük mekanik özelliklere sahiptir ve bu durumdan dolayı yapısal uygulamalarda kullanımı azdır. PAN (Poli akrilo nitril) tabanlı karbon liften üretilmiş kompozit malzemeleri daha sağlam ve daha hafif olmalarından dolayı sürekli olarak geliştirilmektedir. PAN'ın karbon lifine dönüşmesi oksidasyon, karbonizasyon, yüzey iyileştirilmesi ve kaplama gibi işlemler sonucu gerçekleşmektedir (Çelik ve Karaşin, 2014).

3.1.1.Karbon Liflerinin Sınıflandırılması

Karbon lifleri günümüzde en çok kullanılan sentetik liflerden biridir. Özellikle kompozit sektöründe kullanılmasından dolayı kullanım yerlerine göre mekanik, ısıl ve bazı genel özelliklerine göre sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırılmalarından bazıları aşağıda açıklanarak belirtilmiştir (Çelikkanat, 2002).

Modüle göre sınıflandırma (Çelikkanat, 2002):

1. ***Ultra yüksek modüllü tip (UHM) :*** Modülü 500 GPa üzeri olan karbon lifleridir. Union Carbide firmasının P120 tipi (820 GPa) buna bir örnektir. Bu lif mezfaz – pitch bazlıdır.
2. ***Yüksek modüllü tip (HM) :*** Modülü 300 – 500 GPa arası olup mukavemet / modül oranı 5 – 7 10^{-3} civarı olan karbon lifleri bu gruba girmektedir. Toray'ın PAN bazlı M50 modeli (500 GPa) bu gruba iyi bir örnektir.

3. ***Orta Modüllü (IM) :*** Modülü 300 GPa'ya kadar olup mukavemet / modül oranı 10^{-2} civarı olan karbon lifleri bu gruba girmektedir. Örnek olarak Toray'ın PAN bazlı M30 modeli (294 GPa) gösterilebilir.
4. ***Düşük Modüllü (LM) :*** Modülü 100 GPa'dan düşük olan karbon lifleri bu gruba girer. Isotropik bir yapısı olan bu liflerin genelde düşük mukavemet özellikleri vardır.

Mukavemete göre sınıflandırma (Çelikkanat, 2002) :

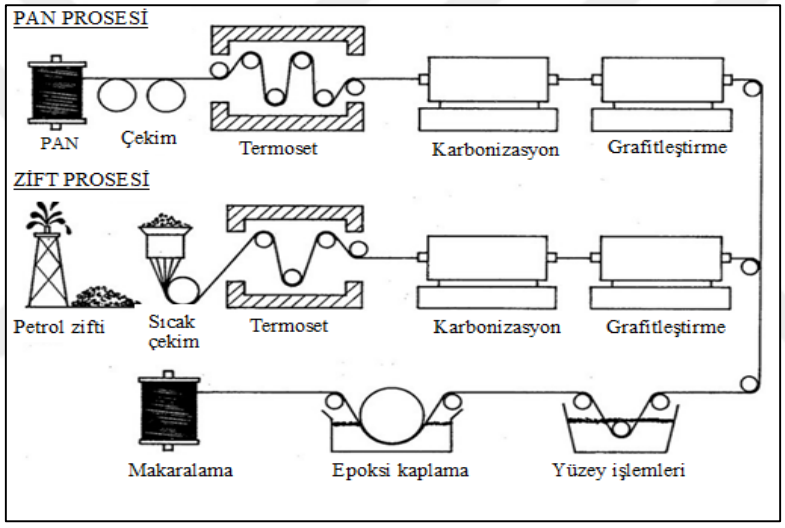
1. ***Ultra Yüksek Mukavemetli (UHS) :*** Mukavemeti 5 GPa'dan yüksek olup mukavemet / sertlik oranı $2 – 3.10^{-2}$ olan karbon lifleri bu gruba girmektedir. Örnek olarak Toray'ın PAN bazlı T1000 modeli (7.06 GPa) gösterilmiştir.
2. ***Yüksek Mukavemetli (HS) :*** Mukavemeti 3 GPa'dan yüksek olup mukavemet / sertlik oranı $1.5 – 2.10^{-2}$ olan karbon lifleri bu gruba girmektedir. Hercules'in PAN bazlı AS-6 modeli (4.14 GPa) bu gruba bir örnektir.

Son ısıl işlemlerine göre sınıflandırma (Çelikkanat, 2002):

1. ***Son işlem sıcaklığı 2000 ^{O}C üzeri olan karbon lifleri:*** Bu gruba yüksek modüllü tipler girmektedir.
2. ***Son işlem sıcaklığı 1500 ^{O}C civarı olan karbon lifleri:*** Bu gruba yüksek mukavemetli tipler girmektedir.
3. ***Son işlem sıcaklığı 1000 ^{O}C'ye kadar olan karbon lifleri:*** Bu gruba düşük modüllü ve mukavemetli tipler girmektedir.

3.1.2.Karbon Liflerinin Üretim Prosesleri

Karbon liflerinin yapımında kullanılan hammaddeler genellikle PAN (Polyakrilonitril), selülozik lifler (Viskoz halde rayon, pamuk) ve zift (pitch) gibi yapılardır. 1960' dan sonra 1980 yılına kadar A.B.D.'de kabon liflerinin hammaddeye bağlı olarak farklı üretim yöntemleri üzerine çeşitli patentler geliştirilmiştir (Çelikkanat, 2002). Karbon liflerinin kullanılan hammadde cinsine göre üretim yöntemi Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Karbon lifi çekim prosesleri (www.carbonfiber.life, 2019)

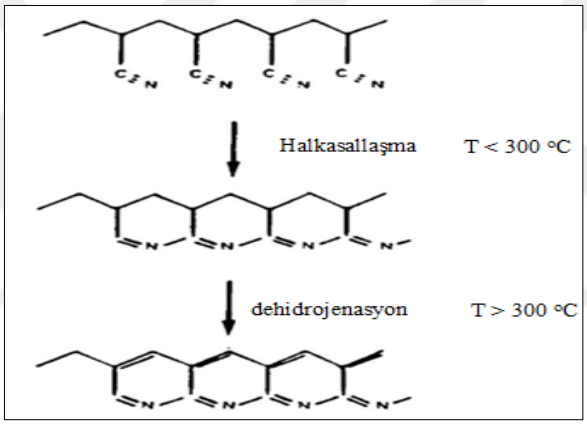
PAN (Poliakrilnitril) Bazlı Karbon Lifleri Üretim Yöntemi

Günümüzde ileri teknoloji karbon lifleri istenilen oryantasyon ve moleküler kristallik yapısına sahip, genelde yapısında nitrojende bulunduran aromatik polimer grubudur. PAN bazlı karbon lifleri diğer hammadde çeşitlerinden elde edilen karbon gruplarına göre çok daha fazla ticari ilgi görmüşlerdir. PAN esaslı karbon liflerinde üretim üç ana basamaktan oluşmaktadır (Çelikkanat, 2002).

1. 200 – 300 ^{O}C'de oksidatif stabilizasyon.

2. 1000 ^{O}C'de karbonizasyon (1500 ^{O}C'ye kadar çıkabilir).
3. Lif tipine bağlı olarak 1500 – 3000 ^{O}C arası grafitizasyon.

PAN hammaddesi ilk aşama olarak gergin bir durumda 200-300 ºC' de oksidasyon işlemine maruz bırakılmaktadır. Bu işlem PAN hammaddesini plastik olmayan bir halkasal bileşik yapısına getirmektedir. Watt ve Johnson bu işlem için 150-400 ºC aralığında yapılmasını önermektedir. Bu yapının elde edilmesi iki kademede gerçekleşmektedir. Birinci kademe halkalaştırma ikinci kademe ise dehidrojenasyon'dur. Bu basamaklar Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. PAN öncüsünden oksidatif stabilizasyon ile basamak polimerin oluşması (Çelikkanat, 2002: Barton ve Borsig 1988'den).

Bu basamaklar arası sıcaklıklar kademeli olarak artırılmaktadır. Stabilizasyonu sağlamak için birkaç saat beklenmesi tavsiye edilmektedir. Lifin gergin tutulmasındaki amaç oksidasyon basamağı sırasında lif gevşemelerini önlemek ve bulunduğu yapısal oryantasyonunu kaybetmesini önlemektedir. Germe sırasında meydana gelecek olan uzama miktarları üretim şekillerine göre değişiklik gösterebilmektedir. Johnson bu konudaki uzama miktarını %12 den az bir uzama miktarı ile kabul edilebilir olduğunu savunmaktadır (Çelikkanat, 2002).

Yeni bir patent PAN hammaddesinin hızlı stabilizasyonunu savunmaktadır. Bu patent ilk safha materyalden maksimum plastiğin elde edildiği sıcaklıkta gerçekleştirilmektedir (çekim %10-%50). İkici safha 0.01-0.2 g/ denye gerginlikte 200-300 ^{o}C sıcaklıkta gerçekleşmektedir. Toplam işlem süresi 15-60 dakikadır (oksijen atmosferi içerisinde geçen süre) (Çelikkanat, 2002).

Oksidatif proses ile lifler yüksek sıcaklıklardaki işlemlere dayanım kazanmaktadır. Tablo 3.1' de oksidize edilen ve edilemeyen liflerin çeşitleri verilmiştir. Oksidasyon sonrası lifler 1000 ^{o}C'nin üzerindeki sıcaklıklara gergisiz olarak karbonize edilmektedir. Karbonizasyon işlemi sırasında karbon dışı yapılar (CHN, NH_3,H_2) uzaklaştırmalıdır ve başlangıçtaki PAN'nın yaklaşık yarı ağırlığında bir yapı elde edilmektedir (Çelikkanat, 2002).

Tablo 3.1. PAN liflerinin karbonizasyonu (Mukhopadhyay,1993)

Sıcaklık ^{o}C	**Oksidize edilmeyen lifler**	**Oksidize lifler**
Ön oksidasyon 220		OH,CO ve COOH gruplarını içeren yükselen polimerin oluşumu
220-300	-Yükseltme oluşumuna göre ekzotermik -Yükselmeyen polimerin bozunması	-Az miktarda ekzotermik -Yükselmeyen polimerin bozunması
300-400	Yükselmeyen polimerin bozunması	Polimer çapraz bağlarının oluşması
400-700	NH_3,HCN,CH_4 ve H_2'nin oluşumu	CH_4 ve H_2'nin nispeten daha az oranda oluşumu
700-1000	-HCN ve N_2'nin yükselen polimerden oluşumu -Ana yapının oluşumu	

Karbonizasyon iki aşamadan oluşmaktadır. 400- 600 ^{o}C arasında denitrojenasyon işlemi yapılır ve 700 ^{o}C'de nitrojen eleminasyonu devam etmektedir. 900 ^{o}C' de maksimum seviyesine ulaşmaktadır. 1300 ^{o}C' de lif içerisindeki nitrojen en az seviyededir (Çelikkanat, 2002).

Karbonizasyon sonrasında elde edilen lifler karbon dışı yapılar neredeyse temizlenmiş ve grafite benzer bir yapı oluşmuştur. 2500 ^{o}C'nin üzerindeki ısıl

işlemler ile (grafitizasyon) oryantasyon ve kristallik lif ekseni yönünde artmaktadır (Çelikkanat, 2002).

Mezofaz Zift Bazlı Karbon Lifi Üretimi

Ziftin uygun çözücü sistem ile karbon lifi üretimine hazır hale getirilmesi mümkündür. Yüksek moleküler ağırlıklı aromatik ziftlerin genelde doğal yapıları anizotropiktir. Bunlara mezofaz denmektedir. Çekim sonrası mezofaz moleküller oryente edilip lif eksenine paralel hale getirilir ve termodinamik olarak sağlam bir yapı elde edilmektedir. Gerçek dönüşümden önce zift çekime uğrayacak lif haline gelmektedir. Bu üretimin işlem basamakları aşağıdaki gibidir (Çelikkanat, 2002).

1. Ticari zift => mezofaza polimerizasyon
2. Eriyikten çekim
3. Hava ortamı içinde stabilizasyon
4. Karbonizasyon
5. Grafitizasyon

Zift hammaddesi 350 ºC'de uygulanan ısıl işlem ile mezofaza dönüşmektedir. Bu yapı içerisinde hem izotropik hem de anizotropik kristal yapıları bünyesinde bulundurmaktadır. Çekim sonrasında izotropik yapılarda yumuşama noktasından daha düşük bir sıcaklıkta enjekte edilebilecek bir duruma gelmektedir. Bundan sonraki basamak olarak ise lif 1000 ºC'de karbonizasyona geçmektedir. Bu metodun avantajları stabilizasyon ve grafitizasyon herhangi bir germe yada çekme işlemine gerek duyulmamaktadır (Çelikkanat, 2002).

3.1.3.Karbon liflerinin özellikleri

Karbon lifleri yüksek mukavemetleri ile ön plana çıkmaktadır. Bazı yöntemler ile (kaplama, içine esnek bir malzemeden katkıda bulunma veya kristal yapısında farklı ısıl işlemler uygulamak gibi) mukavemeti daha da yukarılara

çekilmek istenmektedir. Tablo 3.2' de elde PAN ve zift bazlı karbon liflerine ait bazı özelliklerin karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo 3.2. Karbon liflerinin mekanik özellikleri (Çelikkanat, 2002).

Özellik	PAN bazlı lif	Zift bazlı lif
Mukavemet (GPa)	1,8 – 7,0	1,4 – 3,0
Modül (Gpa)	230 – 540	140 – 820
Kopma Uzaması %	0,4 – 2,4	0,2 – 1,3
Yoğunluk (g/cm3)	1,75 – 1,95	2,0 – 2,2

Karbon liflerinin basma kuvvetlerine mukavemetleri ise Melanitis ve Galoitis tarafından Raman Spektroskopik yöntemi kullanılarak araştırılmıştır. Bu test sisteminde liflere lif boylarının uzantısınca bir baskı kuvveti uygulanmaktadır. Zift bazlı karbon lifi testte kâğıt yapraklara benzer düzgün bir duruma dönüşmektedir. PAN bazlı ise yapısal bozulmalara uğramaktadır. Lif eksenine dik şekilde uygulanan basma kuvvetlerine karşı dayanımı ise PAN bazlı karbon lifleri daha yüksek mukavemetli çıkmışlardır.

Karbon liflerinin yoğunluğu kullanılan hammadde ve ısıl işleme bağlı olarak 1,6 ile 2,2 g/cm^3 aralığında yer almaktadır. Karbon lif üretiminde kullanılan hammadde yoğunluğu 1,14 ile 1,19 g/cm^3 arasında değişiklikler göstermektedir. Elde edilen lifler de modüllerinde artış grafitizasyon sıcaklığının artırılması ile artmaktadır (Yaman ve ark., 2007)

Karbon lifleri kullanılan malzemeler 1020 çelikten 5 kat daha dayanıklı ve 5'te 1 i kadar daha hafiftir. Aynı şekilde 6061 alüminyum konstruksiyonlardan 7 kat daha dayanıklı iken 2 kat daha sert ve 1,5 kat kadar daha hafiftir. Karbon lifleri yorulma dayanımı bilinen tüm metallerden daha çok dayanıklıdır. Ziftten elde edilen karbon liflerinin ise elektriksel iletkenliği bakırdan 3 kat daha fazladır. PAN esaslı karbon lifleri zift esaslı karbon lifleri ile karşılaştırılmış daha yüksek sıkıştırma dayanımına, daha fazla kopma uzamasına ve daha düşük modüle sahip oldukları görülmüştür. PAN esaslı karbon lifleri kullanım esnasında optimum lif özelliklerini sağlamaktadır Tablo 3.3 kullanım alanlarına göre PAN esaslı karbon

liflerin özellikleri verilmiştir ve Tablo 3.4' de zift bazlı karbon liflerinin kullanım alanlarına göre bazı mekanik özellikleri verilmiştir (Yaman ve ark., 2007).

Tablo 3.3. PAN esaslı karbon liflerinin özellikleri (Yaman ve ark., 2007).

Ticari			**Uzay endüstrisi**		
Özellikler	**Birimi**	**Standart modülü**	**Standart modül**	**Orta modül**	**Yüksek modül**
Germe modülü	GPa	228	220-241	290-297	345-448
Germe dayanımı	MPa	380	3450-4830	3450-6200	3450-5520
Kopma uzaması	%	1,6	1,5-2,2	1,3-2,0	0,7-1,0
Elektriksel özdirenç	μΩ*cm	1650	1650	1450	900
Isıl iletkenliği	W/m*K	20	20	20	50-80
Eksen yönünde Elektiksel uzama katsayısı	10-6 *K	-0,4	-0,4	-0,55	-0,75
Yoğunluk	g/cm3	1,8	1,8	1,8	1,9
Karbon içeriği	%	95	95	95	+99
Lif çapı	μm	6-8	6-8	5-6	5-8

Tablo 3.4. Zift bazlı karbon lifleri özellikleri (Yaman ve ark., 2007).

Ticari			**Uzay endüstrisi**	
Özellikler	**Birimi**	**Düşük modül**	**Yüksek modül**	**Ultra Yüksek modül**
Germe modülü	GPa	170-141	380-620	690-965
Germe dayanımı	MPa	1380-3100	1900-2750	2410
Kopma uzaması	%	0,9	0,5	0,4-0,27
Elektriksel özdirenç	μΩ*cm	1300	900	220-130
Isıl iletkenliği	W/m*K	-----	-----	-----
Eksen yönünde Elektiksel uzama katsayısı	10^{-6} *K	-----	-----	-----
Yoğunluk	g/cm3	1,9	2,0	2,2
Karbon içeriği	%	+97	+99	+99
Lif çapı	μm	11	11	10

İnorganik bir materyal olan karbon lifleri nem, açık hava, çözücüler, baz ve zayıf asitlerden oda sıcaklığında etkilenmemektedir. Ancak yüksek sıcaklıkta oksidasyondan oldukça fazla etkilenmektedir (Yaman ve ark., 2007). Silizan, boralizan,SiCN SiBCN SiCO silikon veya fenolik reçineler ile karbon liflerinin sıvı fazda kaplanması ile SiC kompozitlerin bağlanması ve metal matrislerin lif ile güçlendirme işlemi düşük maliyet ile elde edilebilmektedir (Zhou ve ark., 2003)

Karbon liflerinin metan absorpsiyon kapasitesi incelendiği zaman gözenek büyüklükleri 1-2 nm olduğu zaman maksimum olduğu görülmüştür (Wu ve Pan, 2002).

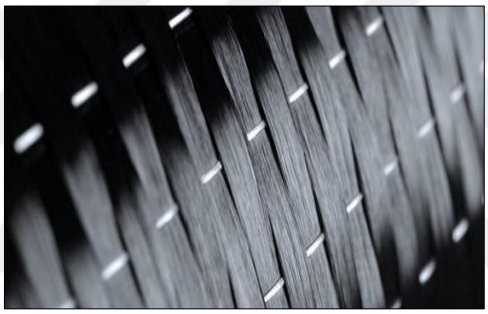
3.1.4.Karbon Liflerinin Kullanım Alanları

Karbon lifi kompozit malzeme yapımında savunma sanayi sektöründen inşaat sektörüne kadar otomotiv sektöründen tekstil sektörüne uzay sanayi sektöründen peyzaj mimari sektörüne ve hatta tıp alanına kadar oldukça değişik ve geniş alanlarda kullanımı olmaktadır. Karbon lifler kolay bir şekilde erimedikleri için yüksek sıcaklıkların oluştuğu makine aksam ya da yardımcı elemanlarında kullanılmaktadır. Düşük yoğunluğa ve yüksek mukavemete sahip olmasından dolayı oldukça fazla kullanım alanına sahip bir malzeme sınıfındadır. Şekil 3.3’ de dokunmuş durumdaki karbon liflerinden bir kesit verilmiştir.

Epoksi ve poliimid reçineleri yardımıyla karbon lif içerikli üretilen kompozit malzemelerde uzay sektöründe kullanımı bulunmaktadır. Uzay ve uçak sanayinde kullanılan hafif metallerin (alüminyum gibi) takviyesinde patlama anında balistik etkilere karşı korumak amaçlı olarak parçacıkların ilk çarpma anındaki yüzeylerin oluşturulmasında, spor malzemelerinin (tenis, buz hokeyi, kayak gibi) eklem yerleri ya da hareketi fazla olan yerlerinde karbon lifleri kullanılmaktadır. Ortopedik malzemelerin sağlamlığını ve yanmazlığını arttırmak amacı ile karbon lifleri kullanılmaktadır. Karbon lifinin ve İnorganik lifin bir organik latex yardımı ile birbirine bağlanması sonucunda oluşan kompozit malzemeler otomobillerin hava yastıklarında kullanılmaktadır (Yaman ve ark., 2007).

Karbon lifi ve termoplastik bir reçineyle oluşturulan kompozit malzemeler notebook parçalarında ve elektronik devre altlıklarının parçalarında kullanılabilmektedir (Schueler ve ark., 2001).

Günümüzde uzay sanayi, askeri alanda hafif mühimmat üretimi, dayanıklı makine elemanları, spor arabalar, uzay mekikleri, balıkçılık, golf, laboratuvar malzemeleri, tıp vb. birçok alanda kullanılmaktadır. Yapılan araştırmalarda karbon liflerinin kullanım amaçları ve kullanım alanına göre birçok avantaj sağladığı gözlenmektedir. Şekil 3.4' de karbon liflerinden yapılmış kullanım alanları farklı olan ürünler verilmiştir.



Şekil 3.3. Karbon liflerinin dokunmuş hali ile elde edilen kumaş örneği (www.malzemebilimi.net, 2019)



Şekil 3.4. Karbon lifinden elde edilmiş bazı ürünler ve kompozit olarak kullanılmış askeri miğfer (www.advenport.com, 2019; www.teknolojiprojeleri.com, 2019; www.defenceturk.net, 2019; tr.banggood.com, 2019)

3.2. Aramid Lifi

Aramid Lifleri yüksek koruyucu giysilerin yapımında kullanılan bir para-aramid lifi olarak bilinmektedir. Aramid lifleri; aromatik poliamid lifleridir. Amid bağları (-CO-NH-) en az %85'i direkt olarak iki aromatik halka arasında bulunmaktadır. Aramid polimerleri bir amin grubu ile bir karboksil grubun reaksionları sonucu oluşmuş polimer grubudur. Aramid polimerleri meta aramid ve para aramid olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır (Çay ve ark., 2007). Para-aramid, en basit formu poli p-fenilen-tereftalamid'dir ve piyasada Kevlar® ve Twaron® lifleri olarak bulunmaktadırlar. Meta-aramid ise Nomex® adı altında ticarileştirilmiş olan bu lifler, poli-m-fenilenisoftalamid yapısındadır. Meta-aramid lifleri düşük oryantasyon derecesi nedeniyle düşük modüllü olduklarından balistik koruma ürünlerinde tercih edilmemektedir (Çay ve ark., 2007). Bu liflerin ticari isimleri, tescil yılı ve çeşitleri Tablo 3.5' de görülmektedir.

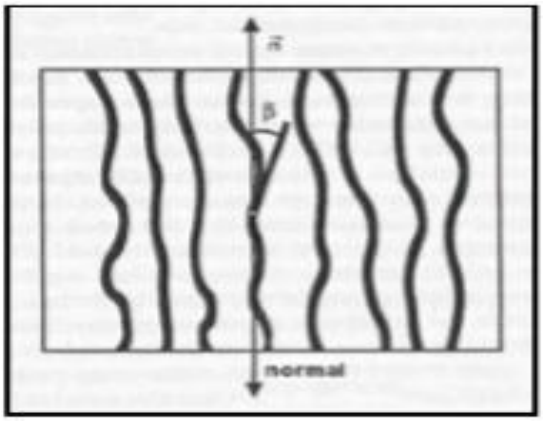
Tablo 3.5. Aramid lifleri tescilleri ve çeşitleri

Lif adı	Marka tescili	Tescil Yılı	Çeşitleri
Kevlar®	A.B.D.	1965	Kevlar® 29, 49, 68, 119, 129, 149
Twaron®	Hollanda, Japonya	1984	Twaron® Twaron® yüksek modüllü
Nomex®	A.B.D.	1967	-
Technora®	Hollanda, Japonya	1987	T-200 Rubber Reinforcement. T221, T220N Rope, Cable,Cord. T-240 Fabrics, Composites.

Ticari olarak en çok bilinen PPTA yapıdaki aramidler; Kevlar® (DuPont, ABD), Twaron® (Teijin Aramid, Japonya), MPIA yapıdaki Nomex® (DuPont, ABD), Teijinconex® (Teijin Aramid, Japonya) ve 3,4'-POP-T kopolimer yapıdaki Technora® (Teijin Aramid, Japonya) lifleridir (www.tekniktekstiller.com, 2019).

3.2.1.Aramid Üretim Prosesleri

Aramid liflerinin lif çekim çözeltisi sıvı kristalin yapısı göstermektedir. Aramid lifin üretiminin ilk basamağı % 100'lük sülfürik asit yardımıyla hazırlanmış çözeltinin 80°C'a ısıtılmasıdır. Bu sıcaklıkta, ağırlıkça %10 civarındaki polimer konsantrasyonunun üzerindeki konsantrasyonlarda çözelti sıvı kristalin faza tekabül etmektedir. Sıvı kristalin çözeltinin şematik gösterimi Şekil 3.5' de verilmektedir. (Çay ve ark., 2007).



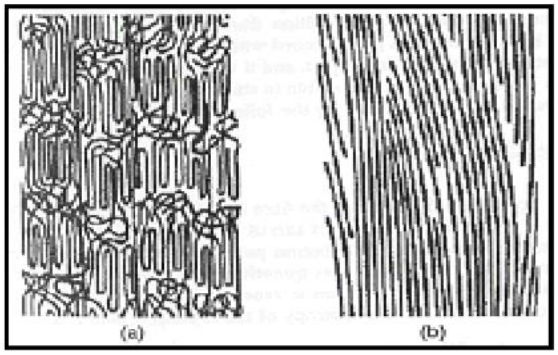
Şekil 3.5. Sıvı kristalin çözeltinin şematik gösterimi (Çay ve ark., 2007).

1965 yılında DuPont şirketi, yakıt ve petrolün atığındaki azlığından kaynaklı olarak yeni hafif ve dayanıklı bir plastik malzemenin ihtiyaç olduğunu fark etmiştir. Bu malzemeyi geliştirmek ve üretmek için polimer hammaddeleri yardımı ile Stephanie Kwolek önderliğinde kiraladıkları bir bilim adamı araştırma ekibi olmuştur. Bu araştırmaların sonucunda, Kwolek, poli-p-Fenilen-tereftalat ve polibenzamid polimerlerinin geliştirilmesinde büyük etkili olmuş ve yeni bir polimer üretmişlerdir (Çay ve ark., 2007).

Charles Smullen adında bir teknisyenden yeni buldukları polimer lifinin ‘‘eğirme makinesi’’ adıyla bilinen makineden eğirmesini istenmiştir. ‘‘Eğirme perdeleri’’ bu yeni lifin dayanımını test edilmesi amacıyla yeniden düzenlenip eğirme yapılması sağlanmıştır. Naylon ve naylon gibi bazı lifler test sırasında sürekli kırılmıştır, ancak Kwolek, lifinin kırılmayacağını tahmin etmektedir. Keşiflerinin yöneticileri tarafından onaylanmasının ardından, bu zamana kadar önceden keşfedilmemiş bir polimer kimyası bilim dalı oluşturmuştur. 1971'de, bu üretilen yeni lif daha ince bir lif haline getirilip test edilmiş ve Dünya’ya Kevlar® adı altında tanıtılmıştır (Çay ve ark., 2007).

Lif çekim çözeltisi düzeden geçtikten sonra bir hava boşluğundan geçmektedir. Burada koagulasyon banyosuna giriş hızı artmakta ve kristaller kısmen paralel hale gelmektedir. Katılaşmayı sağlanmak için soğuk sudan oluşan

bir koagulasyon banyosundan geçemektedir.. Lif çekimi sonunda çok yüksek bir oryantasyon sağlanmaktadır (oryantasyon açısı 12°'den az), ancak daha sonra gerilim altında çok kısa sürelerde bir art-ısıl işlem yapılarak kristalizasyon artırılmaktadır. Isıl işlem sonrasında oryantasyon açısı 9°'nin altına düşmektedir. Para-aramid lifleri, yüksek modülleri ve yüksek sıcaklığa dayanıklı olmalarından dolayı balistik korumalarda üretilen malzemelerde kullanılmaktadır. Merminin kinetik enerjisinin absorbsiyonu, enine ve boyuna dalga yayılması ve sürtünme nedeniyle enerji dönüşümüne bağlıdır. Darbe enerjisinin %50'si kadarının dalga yayılması sayesinde absorbe edildiği ifade edilmektedir. Bu nedenle yüksek modüllü para-aramid lifleri çok uygundur. Örneğin, para-aramidler de dalga yayılma hızı 8000 m/s civarındadır ve bu değer poliamidden dört kat daha yüksektir. Bununla birlikte yüksek dalga yayılma hızları sağlayan çok yüksek bir modül, tek başına yeterli değildir. Örneğin, karbon liflerinin kırılganlığı, balistik kumaşlarda kullanımlarını sınırlandırmaktadır. Böylece liflerin darbe etkisi ile deformasyonu ve uzaması da büyük önem taşımaktadır. Kurşun penetrasyonundan önce ve darbe etkisiyle liflerin ve/veya kumaş yapısının maksimum uzamasından sonra, merminin kumaş/mermi ara yüzeyindeki sürtünme kuvvetlerini yenebilmesi için de ek bir enerji kaybı gerekmektedir. Bu nedenle sürtünme kuvveti de balistik korumada önemli bir faktördür. Çarpma esnasında çarpmadan dolayı darbe alanında büyük bir ısı enerjisi açığa çıkmaktadır. Diğer polimerlere göre para-aramidlerin termal dirençleri oldukça yüksek olduğundan, kullanımları daha uygundur (Çay ve ark., 2007). Poliamid ve PPTA liflerinin içyapısının şematik gösterimi Şekil 3.6' da karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.6. (a) Poliamid 6 (b) PPTA liflerinin içyapısının şematik gösterimi (Çay ve ark., 2007)

3.2.2.Aramid Liflerinin özellikleri

Mekanik Özellikleri

Aramid tiplerini ve özelliklerine dahil dayanımın, modül ve kopma uzaması Tablo 3.6' da verilmiştir. Kevlar® Lifleri yüksek koruyucu giyisilerin yapımında kullanılan bir para-aramid lifi olarak bilinmektedir (Çay ve ark., 2007; Çelikkanat 2002).

Aramid lifleri içinde para-aramid gruba giren Technora® lifleri, kopolimerlerden oluşmakta ve PPTA (Poli-p-fenilen-taraftalamid)'dan farklı bir proses (güçlü asitlerin kullanılmadığı) izlenerek üretilmektedir. Kopolimer yapıdaki Technora® lifleri, Teijin firması tarafından geliştirilmiş önceleri HM 50 olarak bilinen (Bunsell, 2009). Technora® lifleri; filament (kauçuk takviyesi, halat, kord, örme ve dokuma kumaşlar ve genel endüstriyel malzemelerde), kırpılmış (kauçuk, kompozit ve çimento takviyelerinde, asbestin yerine), kesikli (iplik eğirmede, dokusuz yüzeylerde) ve eğrilmiş (koruyucu giysiler, genel endüstriyel malzemeler ve kauçuk takviyelerinde) olmak üzere 4 formda tedarik edilebilir (www.teijinaramid.com, 2019).

Tablo 3.6. Aramid tipleri (Çay ve ark., 2007)

TİP	Dayanım (mN/tex)	Modül (N/tex)	Kopma uzaması (%)
Kevlar® 29	2030	49	3,6
Kevlar® 49	2080	78	2,4
Kevlar® 149	1680	115	1,3
Nomex®	485	7,5	35
Twaron®	2100	60	3,6
Twaron® yüksek modüllü	2100	75	2,5
Technora®	2200	50	4,4

Kevlar® çok hafif ve karbon ihtiva eden yapısı ile çok sağlam liflerden oluşan bir malzeme olarak karşımıza çıkmaktadır. Aromatik poliamid ailesinde Kevlar® en sağlam ve bazı özellikler açısından öne çıkan yapay liflerdendir. Yeni nesil çok hafif bisiklet aksesuarları lastikler, özellikle yarış arabalarının yanmaz kısımları, araba sektöründe tutuşurluk olan yerlerde yanmaya karşı direnç sağlamak amaçlı, yelkenlilerin yelkenlerinden, kurşungeçirmez zırhlara kadar değişen endüstride zorlu alanlar ve ileri teknoloji uygulamalarının kullanımı için, yüksek mukavemet, yüksek moleküler modüllü, tokluk ve ısıl stabilizasyonunun kombinasyonu için geliştirilmiş bir lif olmuştur. Çeşitli Kevlar® türlerinin bazı mekanik özellikleri Tablo 3.7'de verilmiştir.

Kevlar® (aramid) liflerinin ısı direnci yüksek seviyelerde olduğu için genel anlamda lif-lif veya lif-parçacık arasındaki sürtünmeden kaynaklı ısıya dayanım sağladığından bu sebeple ortaya çıkan ısı etkisiyle erimemektedir. Bazı aramid liflerinin mekanik özellikleri Tablo 3.8' de belirtildiği gibidir.

Tablo 3.7. Çeşitli Kevlar® türlerinin dayanım özellikleri (İsmail ve ark. 2018)

Sınıfı	Yoğunluk (g/cm^3)	Gerilim modülü (GPa)	Gerilme direnci (GPa)	Gerilme uzaması (%)
29	1.44	62-83	3.6	4.0
49	1.44	124-131	3.6-4.1	2.8
68	1.44	99	3.0	3.3
119	1.44	55	3.1	4.4
129	1.45	99	3.4	3.3
149	1.47	186	3.4	2.0

Tablo 3.8 Bazı aramid liflerinin mekanik özellikleri (Lewin, 2006)

Ticari İsmi	**Nomex®**	**Teijin conex®**		**Kevlar®**		**Twaron®**		**Technora®**
Polimer	**MPDI**	**MPDI**		**PPTA**		**PPTA**		**ODA/PPTA**
Lif türü	**430**	**Std**	**HT**	**K-29**	**K-49**	**Std**	**HM**	**std**
Yoğunluk (g/cm^3)	1.38	1.38	1.38	1.44	1.44	1.44	1.45	1.39
Mukavemet (Gpa)	0.59	0.61-0.68	0.73-0.86	2.9	3	2.9	2.9	3.4
Uzama (%)	31	35-45	20-30	3.6	2.4	3.6	2.5	4.6
Modül (Gpa)	11.5	7.9-9.8	11.6-12.1	71	112	70	110	72

Kevlar® lifi yüksek koruyucu giysilerin yapımında kullanılan bir para-aramid lifi olarak bilinmektedir.

Kevlar® lifi kuru jet-yaş eğirme yöntemleriyle elde edilebilmektedir. Kevlar® lifleri, düşük ağırlıkta yüksek mukavemet, yüksek modül ve kesilmeye karşı yüksek dayanım göstermektedirler. Elektrik iletkenliği düşüktür, yüksek sıcaklığa ve kimyasallara karşı yüksek dayanıma sahiptir, sıcaklıkla büzülmesi azdır ve yüksek boyutsal stabilite göstermektedir (Çay ve ark., 2007). Bu amaçta Kevlar® liflerinde ürünler arasında mayında koruyucu botlar, eldivenler, kurşun geçirmez yeleklerin dış yüzeyi ve iç levhalarında ve miğferlerde kullanılan kompozit malzeme üretiminde başta olmak üzere balistik amaçlı personel koruyucu zırhların üretiminde başlıca yer almaktadır.

Kevlar® liflerinin Kevlar®29, Kevlar®49, Kevlar®149 olmak üzere başlıca üç tipi bulunmaktadır. Kevlar®149 un kristalitesi diğerleri ile karşılaştırılmış ve daha yüksektir. Bundan dolayı ise dayanımı en yüksek olan Kevlar®, tipidir. Kevlar®29 ise en düşük kristaliniteye sahip olmasından dolayı en düşük dayanıma sahip kevlar® lifi tipidir. Bu sebepten dolayı Kevlar®29 en az oryanasyon gösteren Kevlar® lif tipi olmaktadır. Bu amaçla yapılan araştırmalar ve DuPont firmasının verdiği verilere dayanarak ise Kevlar®149'un, Kevlar®49' dan 1,6 kat;

Kevlar®29'dan 2,3 kat daha fazla oryantasyona sahip oldukları ifade edilmektedir (Çelikkanat, 2002).

Kevlar®29'un dayanımı ve modülü cam liflerinin (E-Cam veya S-Cam) eşdeğer iken öz kütlesi neredeyse cam liflerinin yarısı kadardır. Bu açıdan ise daha hafif kıyafetler üretiminde kullanım için kompozitlerde cam lifleri yerine Kevlar® kullanılması daha ön plana çıkmaktadır. Dezavantaj olarak Kevlar® lifleri cam liflerine oranla daha pahalı ürünlerdir. Kevlar® lifleri nem absorbe edebildiklerinden dolayı Kevlar® takviyeli kompozit ürünler cam liflerinden elde edilen kompozitlere göre çevre şartlarına karşı dayanımı düşük olmaktadır. Kevlar® lifleri Kopma dayanımı ve modülünün yüksek olmasına rağmen sıkıştırılabilirliği nispeten düşüktür. Bunun yanı sıra ise kesilme dayanımı ise yüksektir (Çay ve ark. 2007).

Yukarıdaki anlatılan kevlar® kumaşlarının yanı sıra birçok Kevlar® ürünü de geliştirilmiş olmaktadır. Kevlar® (aramid) lifinden üretilmiş çeşitli giysi, aksesuar ve ekipmanda güvenli ve daha dayanıklı ürünler elde etmek için geliştirilmiştir.

3.2.3.Kevlar® Lif Türlerinin Kullanım Alanları

Burada Kevlar® türlerine göre kullanımlar ayrı ayrı gösterilmiştir. Şekil 3.7' de Kevlar® malzemesinden elde edilmiş balistik ürünlere örnek verilmiştir.

Kevlar® 29 (K29) : Kevlar® ürün türlerinin orijinal ailesi, çok çeşitli desiteksler ve cilalarla benzer gerilme özelliklerine sahiptir. Bu iplikler kurşun uygulamalarında, halatlarda ve kablolarda, kesiklere dirençli eldivenler gibi korucu giysilerde, kask, araç zırhları ve plakaları gibi yaşam koruyucu uygulamalarda ve lastik ile otomobil hortumlarında kauçuk güçlendirme için kullanılır (http://www.dupont.com.tr, 2019).

Kevlar® 49 (K49) :Deniz sporu ürünleri ve hava-uzay uygulamaları için özellikle fiber optik kablo, tekstil işleme, plastik güçlendirme, halatlar, kablolar ve

kompozitlerde kullanılan yüksek modüllü ipliktir (http://www.dupont.com.tr, 2019).

Kevlar® 100: Halatlar ve kablolar, bantlar ve kayışlar, eldivenler ve diğer koruyucu giyim ürünleri ve spor malzemeleri için kullanılan, üretici tarafından renklendirilmiş Kevlar® ipliklerdir (http://www.dupont.com.tr, 2019).

Kevlar® 119: Lastik, otomotiv kemerleri ve hortumları gibi mekanik kauçuk ürünlerde bulunan yüksek seviyeli uzama, esneklik, yıpranma direnci özelliği bulunan iplik türlerdir. (http://www.dupont.com.tr, 2019)

Kevlar® 129: Motosiklet yarış teçhizatları, yaşam koruma aksesuarları, halatlar ve kablolar, petrol ve gaz endüstrisinde kullanılan yüksek basınçlı hortumlarda bulunan hafif, yüksek performanslı, yüksek dirençli iplik türleri. (http://www.dupont.com.tr, 2019)

Kevlar® KM2: Parçalanmaya dirençli dikişler için yüksek performanslı UD'ler ve askeriye için başlıklar ve yelekler için performans gereksinimlerini karşılayan, dokunarak kumaş haline getirilmiş malzemedir. (http://www.dupont.com.tr, 2019**)**

Kevlar® KM2 Plus: Hem askeriye hem de kolluk kuvvetleri çalışanları için yeleklerde ve başlıklarda kullanılan ve yüksek direnç, yüksek sertlik sağlayan daha ince desiteks liftir (http://www.dupont.com.tr, 2019). Şekil 3.7'de askeri amaçlı kullanımdaki Kevlar® ürünlerine örnekler verilmiştir.

Kevlar® AP: Gelişmiş Performans için Kevlar® AP üreticilerin daha ince ve daha sağlam tüketici ürünleri ve endüstriyel ürünler yapmalarına olanak tanımak üzere maliyet etkinliği ve tasarım esnekliğini artırmıştır. (http://www.dupont.com.tr, 2019)

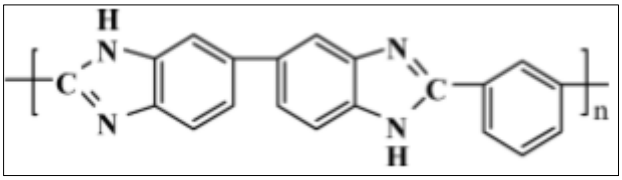


Şekil 3.7. Aramid kumaş ve aramid kumaştan üretilmiş balistik koruyucu yelek ve kask (www.ec21.com, 2019; www.mbfg.co.uk, 2020)

Balistik olarak Para-aramid lifleri koruma amacıyla kullanılmaktadır. Tabanca mermileri ve bıçaklar polis görevlileri açısından tehditlerdir. Orduda ise tüfek mermileri, şarapnel parçaları, el bombaları ve mayınlar gibi daha büyük yapıda tehdit unsurları bulunmaktadır. Bu alanda para-aramid lifli ve liften mamül malzemelerin kullanımı yaygındır.

3.3. Polibenzimidazole (PBI) Lifi

PBI, 1983 yılında celanese şirketi tarafından ticari olarak geliştirilen ve Şekil 3.8' de gösterilen kimyasal yapıya sahip bir heterosiklik polimer sınıfıdır (Wang ve ark.2007). Tümüyle aromatik polimer zincirine sahip "merdiven polimer" olarak bilinen polibenzimidazol polimerinden üretilen polibenzimidazol (PBI) lifleri de, yüksek erime sıcaklığı noktasına sahip, termal ve kimyasal dayanıklılığı oldukça fazla olan yüksek performanslı sentetik bir lif türüdür. PBI lifi nihai kullanım yerleri incelendiğinde genel kullanım alanları ısıya ve aleve dayanıklı yerlerdir. Isıya dayanıklı karakteristlik özelliğinden dolayı ısıya dayanıklı yüksek performanslı lifler kategorisinde değerlendirilmektedir (Kalaycı ve ark. 2014). Polibenzimidazol liflerinin tarihi 1959 yılında Brinker ve Robinson'un polibenzimidazolleri keşfine dayanmaktadır (Brinker ve Robinson 1959). Polibenzimidazolün (PBI) kimyasal yapısı Şekil 3.8'de verilmiştir.



Şekil 3.8. Polibenzimidazolün (PBI) kimyasal yapısı (Wang ve ark.2007).

Bu liflerin kullanımı ısıya dayanıklı koruyucu tekstiller ile başlamış ve günümüze yakıt hücresi, karbon yakalama gibi çevre dostu ve sınırlıda olsa balistik amaçlı kullanımı gözlenmiştir (Kalaycı ve ark. 2014).

Brinker ve Robinson'un polibenzimidazolleri keşfine dayanmaktadır (Brinker ve Robinson 1959). Mekanik dayanımının yanı sıra termal dayanımı da yüksek bir lif geliştirebilmek amaçlı 1961 yılına kadar araştırmalarda bulunmuş ancak 1961 yılında birleşik devletler hava kuvvetleri adına H. Vogel ve C.S. Marvel sıradışı termal ve oksidatif üstünlükte olan polibenzimidazol lifleri üretilmiştir (Kalaycı ve ark., 2014).

NASA ve Birleşik Devletler Hava Kuvvetleri Malzeme Laboratuvarları tarafından desteklenen çalışmalarda polibenzimidazol liflerinin uzay, havacılık ve savunma alanında kullanımı araştırılmış, 1970'lerde Sky Lab dünyaya düştüğünde yanmadan geri dönmeyi başaran tek kısmın polibenzimidazol lifleri ile kaplanmış bir parça olması bu liflerin performansının kanıtı olarak kabul edilmiştir (Kalaycı ve ark., 2014).

1983 yılında amerikan 'celanese americas' firmasının üretiminde olan ticari ölçekli üretilen polibenzimidazol (PBI) lifleri, günümüzde ise sadece 'PBI Performance Products Inc.' Firması tarafından lif, kompozit, kalıp halli reçine veya kullanıma hazır tekstil formda olarak üretimi gerçekleştirilmektedir (Pan ve Sun, 2011; Powers ve Serad, 1986).

İlerleyen kısımlarında PBI polimerinin yapısı, PBI lif haline çekimi, PBI lifinin genel özellikleri, PBI liflerinin kullanılan karışımları ve kullanım alanları açısından incelenmesine yer verilecektir.

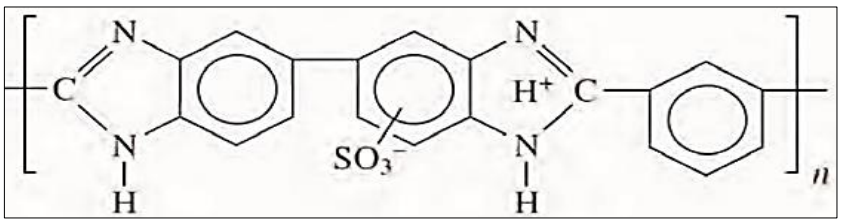
3.3.1.Polibenzimidazolün Genel Yapısı ve Polibenzimidazol Liflerinin Sentezlenmesi

Polibenzimidazol lifleri yüksek sıcaklık dayanıma sahip lifler sınıfındadır. Genel olarak uygulanan lif yönlendirmesi sistemlerinden dolayı lifler belli bir düzen içinde dizlimi sağlamakta bu da liflerin lif çekim esnasında bazı yönlendirme işlemlerinin gerçekleşmesi ile elde edilmektedir. Polibenzimidazol genel olarak yaş ve kuru-jet ve yaş-jet lif çekim yöntemi ile elde edilmektedir.

Polibenzimidazolün Genel Yapısı

Poli-[2,2'-(m-fenilen)-5,5'-dibenzimidazol]' ün kısa yazılımı polibenzimidazol ya da PBI, uzun zincirli aromatik yapılı yüksek kimyasal ve termal dayanım sağlayan polimerlerdir. PBI'ın kimyasal yapısı Şekil 1'de verilmiştir (Kalaycı ve ark., 2014).

Sülfürik aside maruz kalan PBI liflerinin (Şekil 3.9) alev dayanımının artması ve aleve direkt maruz kaldığında %10 daha az büzülme gerçekleştirmesinden dolayı, sülfürik asit ile işlem görmüş PBI liflerinin kullanım alanı çok daha geniştir(Kalaycı ve ark., 2014).

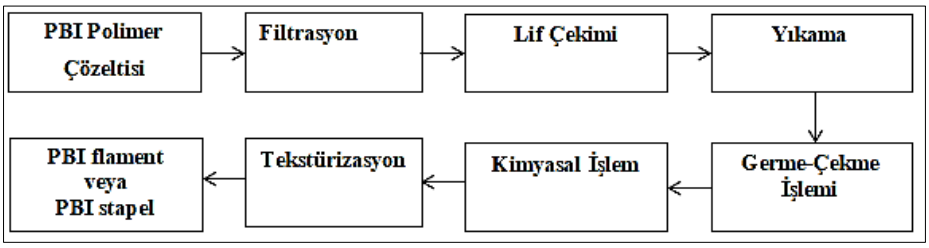


Şekil 3.9. Sülfirik asit ile işlem görmüş polibenzimidazol polimer yapısı (Kalaycı ve ark., 2014; Hearle, 2001)

Polibenzimidazol Lif Çekimi

PBI liflinin genel olarak üretim yöntemi kuru lif çekimidir. Ancak farklı olarak kuru-jet ya da yaş-jet lif çekim yöntemleri kullanılarak ta üretilebilmektedir

(Kalaycı ve ark., 2014). Kuru lif çekim üretim işlem basamakları Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10. PBI lifi kuru çekim üretimi için işlem basamakları (en.wikipedia.org, 2020b)

İlk işlem basamağı olarak başlangıçta; dimetil asetamid (DMAC) olmak üzere sülfürik asit, dimetilformamid ve dimetilsülfoksit (DMSO) gibi maddeler polimer çözeltisinin hazırlanması için çözücü olarak kullanılmaktadır. Bir Polibenzimidazol polimerinin çözeltisi genellikle %25-26 oranında polibenzimeidazol içermektedir ve viskozitesi oda sıcaklığında 1500-3000 poise aralığındadır. Polimer çözeltisini dengede tutmak ve raf ömrünü birkaç günden birkaç aya çıkartmak amacıyla lityum klorit (LiCl) ilavesi de yapılabilmektedir (Tablo 3.9) (Kalaycı ve ark., 2014)

Tablo 3.9. PBI lifin raf ömrünün uzatılması için lityum klorit ilavesi. (Kalaycı ve ark., 2014)

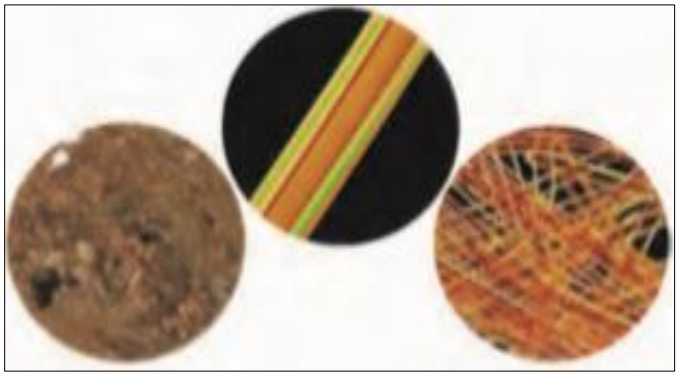
Katı PBI (%)	26,2
Çözücü (DMAC)	72,3
LiCl (%)	1,5
Viskozite (poise)	2100±200
Raf ömrü	6 ay
Renk	Kırmızı kahve arasında

Isı dayanımı yüksek olan kullanımdaki liflerin polimer çözeltisi ve maksimum uygulama sıcaklığı Tablo 3.10'da verilmiştir.

Tablo 3.10. Isı dayanımı yüksek olan bazı liflerin polimer çözeltisi ve maksimum kullanım sıcaklığı (Clark ve Macquarrie, 2008)

Polimer	Polimer Çözeltisi	Maksimum Uygulama Sıcaklığı (ºC)
Polibenzimidazol (PBI)	Dimetil asetamid + lityum klorit	420-450
Para-aramid	Dimetil asetamid + lityum klori	400
Poli-pfenilenbenzobisoksazol (PBO)	Polifosforik asit	450-500
Polidiimidazopiridinile ndihidroksifenilen (PIPD)	Polifosforik asit	450

PBI polimer çözeltisinin filtrasyon işleminden sonra ve yüksek sıcaklıkta lif çekim işlemi yapıldıktan sonra, lif üzerinde artık olarak bulunan lityum klorit ve DMAC (dimetil asetamid) kirliliklerinin uzaklaştırılması amacı için tov bantları ısıtılarak su banyosundan geçirilme işlemine tabi tutulmaktadır. Liflere istenilen mekanik özelliklerin elde edilmesi amacıyla çekme işlemi tabii tutulmaktadır ve alev ile deformasyonunu daha da azaltan sülfürik asit ile işleme sokulmaktadır. Sülfürün PBI nin yapısına kimyasal olarak bağlanması için yardımcı olacak atmosferde nitrojen vb. reaktif olmayan bir gaz ile yüksek sıcaklıklarda ısıl işlemi gereklidir. Son olarak bitim işleminde kullanım alanına göre, liflere konvansiyonel olarak kıvrım verilmekte ve istenilen uzunlukta lif şeklinin kesimi yapılmaktadır. (Şekil 3.11). (Kalaycı ve ark., 2014)



Şekil 3.11. PBI stapel lifleri ve mikroskobik görüntüleri (Kalaycı ve ark., 2014)

Konvansiyonel PBI lif üretiminin haricinde, PBI polimerinden nano lifler de üretilebilmektedir. PBI nano lif üretiminde genellikle elektrospinning nano lif çekim yöntemi kullanılarak ortalama 300 nm çapa sahip lifler üretilebilmektedir (Kim ve Reneker, 1999; textilelearner.blogspot.com.tr, 2019).

3.3.2.Polibenzimidazol Liflerinin Genel Özellikleri

PBI lifleri diğer yüksek performanslı lifler arasında oldukça üstün termal ve oksidatif özellikler sergilemektedir. Bu lifin yoğunluğu hakkında literatürde farklı değerler verilmektedir; 1,43 g/cm^3 (Hearle,2001;Mather ve Wardman, 2011; Vogel ve Marvel, 1961) ve 1,30 g/cm^3, Mukavemet değeri 240-270 cN/tex'tir (Mather ve Wardman, 2011). PBI liflerinin özelliklerinin diğer lifler ile karşılaştırması Tablo 3.11' de verilmiştir.

Tablo 3.11. PBI liflerinin özelliklerinin diğer lifler ile karşılaştırması (Kalaycı ve ark., 2014)

Özellikler	Lif Çeşitleri		
	Aramid	PBI	Poliimid
Yoğunluk (g/cm^3)	1,38-1,45	1,3-1,43	1,41
Erime noktası (℃)	427-482[b]	450[b]	600
Mukavemet (g/denye)	5,3-22	2,7	2-3
[b]: ergimez ancak bozunmaya başlar			

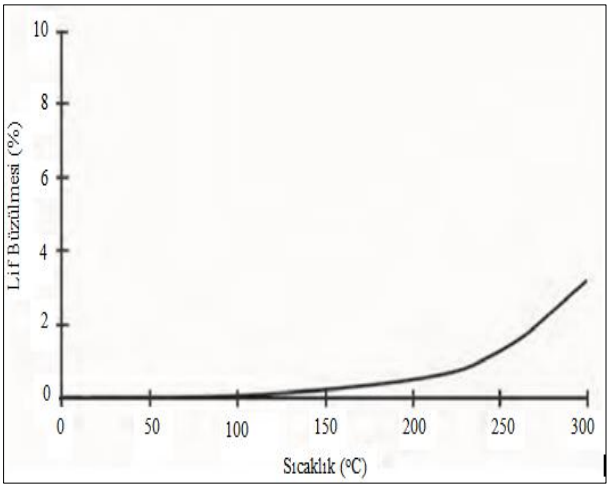
Polibenzimidazol Liflerinin Termal Dayanımı

Yüksek kararlılığı ve 400ºC üzerindeki erime sıcaklığı sayesinde ısıya karşı oldukça dayanıklı olan PBI lifleri, 300ºC'e kadar yapısını ve mukavemetini korumaktadır (Fung ve Hardcastle, 2000). PBI liflerinin termal dayanımı Tablo 3.12' de verilmiştir.

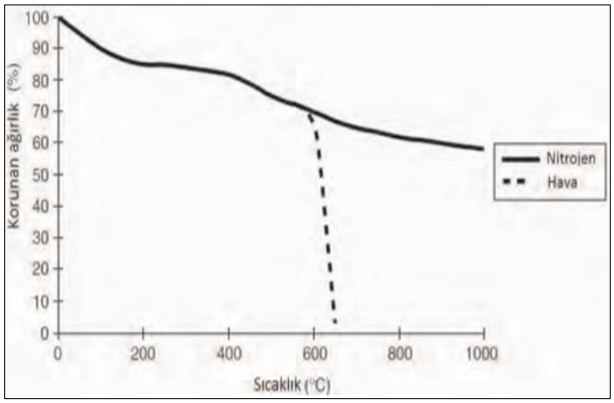
Tablo 3.12. PBI liflerinin termal dayanımı (Kalaycı ve ark., 2014)

Sıcaklık (ºC)	**Kullanım Ömrü**
600	3-5 saniye
450	5 Dakika
400	1 saat
330	24 saat

PBI liflerinin ısı ile büzülme yüzdesini ifade eden Şekil 3.12 ve PBI liflerinin termagrovimetrik analizini gösteren Şekil 3.13' e göre, PBI liflerinin havada 450ºC' e kadar, nitrojen gazı ortamında ise 1000ºC' e kadar sağlamlığını koruduğu ortaya konmuştur (Hearle, 2001; Eichhorn ve ark. 2009b)



Şekil 3.12. Sıcaklık artışı ile PBI liflerindeki büzülme oranı (Hearle, 2001)



Şekil 3.13. PBI liflerinin hava ve nitrojen ile termogravimetrik analizi (Hearle, 2001)

3.3.3.Polibenzimidazol Liflerinin Kullanım Alanları

Polibenzimidazol polimerinin ürünleri hem lif hem de reçine şeklinde farklı kullanım alanlarına sahiptir. Kalıplanmış PBI reçineler, yağ geri kazanımı ve kimya endüstrisinde buhar contaları, valf contaları ya da hidrolik contaları gibi sıvı izolasyonu gerektiren veya hava ve uzay endüstrisinde ısıl ve elektriksel yalıtım sağlayan, yüksek mukavemetli hafif malzemeler için mükemmel bir adaydır (Hearle, 2001).

Balistik koruma amaçlı üretilen kumaşlar için; aramid (Kevlar®, Twaron®, Technora®), yüksek-molekül-ağırlıklı polietilen (Spectra®, Dyneema®), Vectran®, Polibenzimidazol (Zylon®), PIPD (Polypyridobisimidazole) (M5® olarak da bilinmektedir) gibi yüksek mukavemetli lifler birer örnektir. Balistik koruma mümkün olduğu kadar kısa mesafe içinde mermileri tutmayı gerektirdiği için kullanılacak liflerin çok yüksek dayanıma ve düşük elastikiyete sahip olması gerekmektedir (Bozdoğan ve ark.2015). Polynebzimidazol (PBI) liflerinin ısıl dayanımlarına ek olarak konfor özellikleri de üst seviyededir. 815 ℃' de özelliklerini kaybetmediğinden dolayı asbestin yerinede kullanımı bulunmaktadır. Ekonomik olmadığı için çok yüksek koruma gerektiren özel kullanım alanlarında kullanılmaktadır (Çelikkanat, 2002)

PBI koruyucu tekstiller; askeri üniformalardan, astronot kıyafetlerine, itfaiyeci giysilerine, motor sporlarında kullanılan sürücü elbiselerine ve endüstriyel alanda kullanılan giysi ve eldivenlerde sıkça kullanılmaktadır (Şekil 3.14' de) (Kalaycı ve ark., 2014). Balistik kumaşların üretiminde aramid (Kevlar®, Twaron®, Technora®), yüksek-molekül-ağırlıklı polietilen (Spectra®, Dyneema®), Vectran®, Polibenzimidazol (Zylon®), PIPD (Polypyridobisimidazole) (M5® olarak da bilinmektedir) gibi yüksek mukavemetli lifler, bu amaçla kullanılan yüksek performanslı liflere birer örnektir. Balistik koruma mümkün olduğu kadar kısa mesafe içinde mermileri tutmayı gerektirdiğinden dolayı kullanılacak lif çeşitinin çok yüksek dayanıma ve düşük elastikiyete sahip olması gerekmektedir (Bozdoğan ve ark., 2015)

Yukarıda bahsedilen verilere dayanarak para-aramid kadar mekanik dayanımı olması PBO kadar termal ve kimyasal dayanıma sahip olması PBI liflerini balistik konusu hakkında araştırmaya açık hale getirmektedir. PBI lifi için balistik bir kullanımdan söz edilmemiş ancak verileri göz önüne alındığında balistik kullanımda da gerekli koruma seviyelerine göre kullanıma elverişli olduğu düşünülmektedir. Buna ek olarak daha sonraları geliştirilmiş olan PBO (poli-p-fenilenbenzobisoksazol) lifi Zylon® olarak adlandırılmaktadır. Bu araştırmalarda ilk önce poli-benzazoller geliştirilmiş ve bunu takiben lif formu olarak poli-pfenilen-benzobisdiazol (PBZT) lifleri elde edilmiştir (Cunniff, 1999b; Kuroki ve ark., 1997)

Ancak PBZT liflerinin üretiminin proseslerinin pahalı olmasından dolayı, PBZT lifine göre performans ve fiyat açısından üstünlük sağlayacağı düşünülen liflerin geliştirilmesi amacı doğrultusunda araştırmaları sürmüş ve tüm araştırmaların sonunda PBO (poli-p-fenilenbenzobisoksazol) lifleri geliştirilmesi sağlanmıştır.



Şekil 3.14. PBI Lifleri Ve Kevlar®'dan elde edilen ısıya dayanıklı malzemeler (www.pbiproducts.com, 2019; www.primesafetyusa.com, 2019; www.officer.com, 2019.)

3.4.PBO (p-fenilen-2,6-benzobisoksazol) Lifleri

PBO liflerinin ticarileşmesi, PBO ile ilgili tüm patent ve hakları Standford Araştırma Enstitüsünde daha sonraları bu patentlerin tüm haklarını Dow Kimya Şirketi'ne satışı gerçekleşmiştir (Bourbigot ve Flambard, 2002; Kalaycı ve ark., 2015b) Ancak Dow Kimya Şirket'i yedi yıl boyunca PBO polimerinin rijit karakterinden kaynaklanan problemleri ve lif çekiminde iyi veriler elde edememiştir (Kalaycı ve ark., 2015b). Toyobo, PBO lifinin bu rijit karakterinin gelecekte üstünlük sağlayacağını düşünerek Dow firmasına bu lifin geliştirilmesi amacıyla 1991 yılında birlikte çalışmak amacıyla ortaklık kararı alan bu iki firma bundan 3 yıl sonra PBO polimerinin lif haline getirebilecekleri özel bir lif çekimi geliştirilmişlerdir (Bourbigot ve Flambard, 2002). Ancak Dow Kimya Şirketi iş stratejilerindeki değişiklik sebebiyle PBO liflerinin geliştirilmesine katılmaktan

vazgeçmiş böylece 1998 yılında Zylon® ticari ismi ile PBO lifi ilk olarak Toyobo tarafından piyasaya sürülmüştür (Kalaycı ve ark., 2015b).

Zamanla mukavemeti üst seviyelere ulaşan PBO liflerinin günümüzde 5,8 GPa'ı aşan mukavemet değerlerindeki çeşitleri bulunmaktadır (Kalaycı ve ark., 2015b).

Günümüzde PBO lifleri ticari olarak, sadece Toyobo tarafından Poli (p-fenilen-2,6-benzobisoksazol) ya da Zylon® olarak üretilmektedir. Literatürde başta aramid lifi olmak üzere birçok yüksek performanslı teknik tekstil lifleri ile karşılaştırılan PBO lifleri genel olarak üstün özelliklerdedir, aynı zamanda maliyet olarak aramid liflerinden fazla, PBI (polibenzimidazol) lifleri ile ortalama aynı maliyette olduğu kaydedilmiştir (Horrocks,2005; Lewin, 2006).

Konunun ilerleyen kısımlarında PBO liflerinin lif çekimi üretim porsesleri özellikleri ve kullanım alanları anlatılmıştır.

3.4.1. PBO Lif Çekimi ve Üretim Prosesi

Polibenzozol olarak sınıflandırılan, heterosiklik bir polimer olan PBO polimeri yüksek sıcaklıklarda erimeden ayrışmakta ve aromatik yapısı sayesinde çok az sayıda çözücü içerisinde çözünebilmektedir (Kalaycı ve ark., 2015b; Hongu ve ark., 2005; Afshari ve ark., 2008). Bu lifin üretim yöntemi olarak en yaygın kullanılan yöntem kuru jet-yaş lif çekim yöntemidir ve polimer çözeltisi genellikle polifosforik asit kullanılarak oluşturulmaktadır (Afshari ve ark., 2008). Ancak polifosforik asit harici farklı çözücülerin kullanılmasının, üretilen lifin mekanik özelliklerinde kayda değer bir farklılık yaratmadığı ortaya konulmuştur (Kalaycı ve ark., 2015b). Polimer çözeltisinin viskozitesi lifin mekanik özelliklerini etkilediğinden bu konuda önemlidir. 10-14 dL/g' den düşük olan viskoziteye sahip akışkan çözeltiden elde edilen liflerin mekanik özellikleri düşük olarak rapor edilmiştir (Chenevey ve Helminiak, 1986)

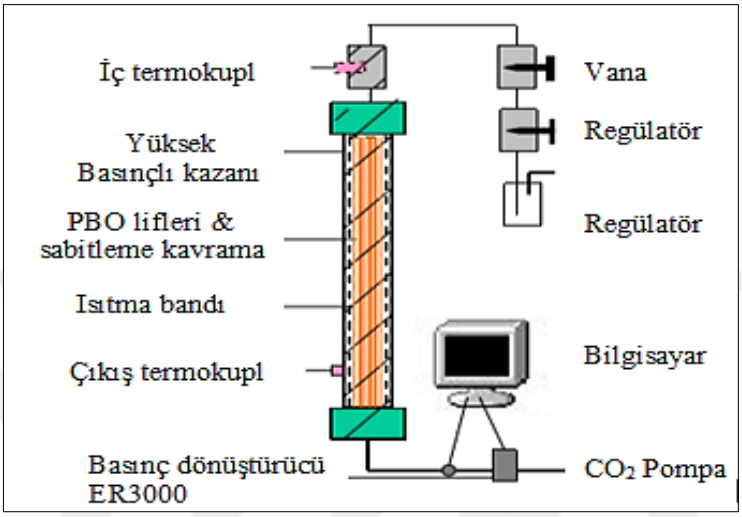
Hazırlanan polimer çözeltisi kuvvetli asit ortamında ısı ve basınç altında, düzeden sisteminden geçirilerek, genellikle oda sıcaklığında su bulunan bir

koagülasyon banyosundan geçirilir, ardından yıkanır, kurutulur ve ısıl işleme tabii tutulur (Kalaycı ve ark., 2015b). Uygulanan ısıl işlem 500–700°C sıcaklıkta, gerilim altında, nitrojen gazı ortamında, birkaç dakika ya da birkaç saniye arasında işlem sürelerinde gerçekleştirilir (Afshari ve ark., 2008). PBO lifleri filament ya da stapel olarak elde edilebilmektedir (Kalaycı ve ark., 2015b).

Koagülasyon banyosu genel olarak oda koşullarındaki sıcaklıkta su içermektedir. Koagülasyonun hızı banyonun içeriğine ve bulunduğu sıcaklıga bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Koagülasyon banyosunun oluşan bu özellikleri üretilen liflerin yapısal ve mekanik özelliklerini direk olarak etkilediğinden büyük önem arzetmektedir. Altın renkte PBO liflerinin üretimi için koagülasyon banyosunda su ve nötralizasyon için kalsiyum hidroksit içerdiği, koagülasyon banyosunda su ve kalsiyum hidroksite ilaveten bakır hidroksit içeren PBO liflerinin mavi olmaktadır (O'Neil,2006). Koagülasyon banyosunun içeriği ve sıcaklığı lifin yapısal özelliklerini ve mekanik özelliklerini etkilediğinden Toyobo firması tarafından geliştirilmiş olan susuz koagülasyon sistemi de PBO lifleri özellikleri için önemlidir (Kalaycı ve ark., 2015b). Lif üretimi esnasında yavaş bir koagülasyon işlemi ile lif yapısı kontrol altında tutulmaktadır (Bunsell, 2009). PBO liflerinin yapılarına karbon nanotüplerin ilavesi de literatürde gösterilen uygulamalardandır. Bu şekilde sadece %10 oranında karbon nano tüp ilavesi ile oluşturulan malzemenin mukavemetinde %50 oranında bir artış oluştuğu görülmüştür (Özdoğan ve ark, 2006). Aynı zamanda literatürde grafen ile güçlendirilmiş PBO liflerinide görmek mümkündür. Polifosforik asit (PPA) ile PBO/grafen karışımları kuru jet-yaş lif çekim prosesi ile lif haline getirilmektedir. %0,2-2 arasında değişken değerli grafen içeren PBO liflerinin mekanik kopma dayanımları ve termal kararlılığı karşılaştırıldığında, %0,2 grafen içeren PBO liflerinin mekanik kopma dayanımları ve termal kararlılığında önemli ölçüde yükseldiği ortaya konulmuştur (Jeong ve ark., 2014).

Fosforik asidin lif çekimide kullanımından sonrasında lif üzerinde kalması nemli ortam ve ışık ile bir araya gelerek lifin yapısında bozunma yaratmasına

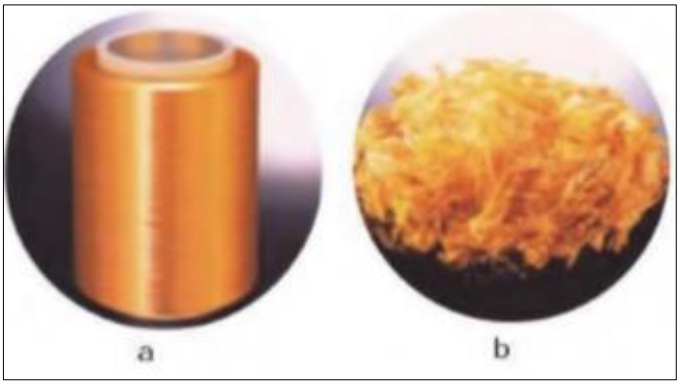
karşın, PBO lifleri için Şekil 3.15'de ayrıntılı olarak verilmiş olan süper kritik CO2 yıkama işlemi geliştirilmiştir (Hu ve Lesser, 2004).



Şekil 3.15. Süper kritik CO2 yıkama sistemi (Hu ve Lesser, 2004).

3.4.2.PBO Lif Özellikleri

Yüksek performans liflerinden olan PBO lifleri, rijit ve lineer olarak sistematik tekrar eden aromatik yapıda ve bu yapıda alifatik CH gruplarının olmayışı sayesinde yüksek kopma mukavemetine ve yüksek modüle sahiptir. Bunun yanı sıra yüksek alev direnci ve ısı dayanımı gibi özellikleri ile diğer organik liflerden ayrılmaktadır. Bu lifler ayrıca sürünme mukavemeti, kimyasal dayanım, kesilme/aşınma direnci ve yüksek sıcaklıkta aşınma direnci gibi özelliklerinde mükemmel performans sergilemektedir (Kalaycı ve ark., 2015b; www.futurefibres.com, 2019). Ancak neme ve UV ışınlarına karşı düşük dayanımı yanında düşük kompresif (sıkıştırma, bastırma, basınç) dayanımı özelliği kullanımını sınırlamaktadır (Sikkema ve ark., 2003) PBO liflerinin stapel ve flament yapıları Şekil 3.16'da verilmiştir.



Şekil 3.16. a) PBO filament lifleri, b) PBO Stapel lifleri (Sikkema ve ark., 2003).

İlk üretildiği yıllarda 20-22 g/denye civarında bir mukavemete sahip olan PBO lifi zamanla 40 g/denye mukavemet seviyelerine ulaşılmış, Zylon® ticari isimli PBO lifinin üretilmesi ile de yaklaşık 45g/denye mukavemet değerinde PBO lifleri üretilmeye başlanmıştır (Kalaycı ve ark., 2015b). Yapılan literatür araştırmalarında PBO liflerinin mekanik özelliklerinin verilerine sahip kaynaklarda farklı değerlere bulunmaktadır. PBO liflerinin yoğunluğu için 1,56 g/cm^3, 1,54 g/cm^3 1,50 g/cm^3 gibi değerler verilmiştir; mukavemet değerleri için 5,8 GPa 3,8-4,8 N/tex; kopma mukavemeti değerleri için 5,6-5,8 GPa, 40-42 g/denye, 3 N/tex, 380 cN/tex, ve elastisite modülü değerleri için, 180-280 GPa, 2000 g/denye, 180N/tex gibi farklı birim değerlerinde ifade edilen değerler ile verilmiştir. Kopma anındaki uzaması %1-3,5 arasında ki değerlere sahip PBO liflerin özgül hacmi 0,64 cm3/g olarak verilmektedir(Kalaycı ve ark., 2015b; Hongu ve ark., 2005; Hearle ve Morton 2008; Scott, 2005).

PBO lifleri, cam lifi, karbon lifi, aramid lifleri, PIPD (polipiridobisimidazol) lifleri gibi teknik tekstil sınıfındaki yüksek performanslı lifler arasından yüksek kopma mukavemetine ve modüle sahip olduğu görülmektedir. Özellikle Para-aramid liflerinin yaklaşık olarak iki katı kadar mukavemeti bulunan PBO lifleri organik lifler arasında yaklaşık olarak en yüksek elastisite modüllüne sahip olmasına ragmen, kayma modülü diğer teknik tekstiller arasındaki yüksek

mukavemet lifleri ile karşılaştırıldığında düşük olduğu görülmüştür. (Tablo 3.13) (Kalaycı ve ark., 2015b).

Tablo 3.13. Oda sıcaklığında çeşitli yüksek performans liflerin Elastisite Modülleri (Kalaycı ve ark., 2015b; Jacobs, 1999)

Lifler	Elastisite modülü(GPa)
Polietilen Lifleri (Dyneema®)	80-130
Aramid Lifleri (Kevlar®, Twaron®)	100-150
PBO Lifleri (Zylon®)	180-280
M-5® Lifleri (polypiridobisimidazol, PIPD)	300-330
Poliimid	2,5
Seramik Lifleri (Nicalontm)	210

Altın rengine benzer renkteki PBO lifleri yüksek mekanik özellikleri bulundurması durumuna rağmen, esnek, yumuşak bir tutuma sahip ve çok hafiftir (Kalaycı ve ark., 2015b; Hongu ve ark., 2005; www.formula1-dictionary.ne, 2019; Collier ve Tortora, 2000)

Neme karşı boyutsal olarak kararlı ama nem geri kazanımı özelliği açısından oldukça düşük değerlere sahip olan bu lifler için literatürde %0,6 ile %3 arasında değişkenlik gösteren nem geri kazanımı değerleri verilmektedir (Kalaycı ve ark., 2015b).

PBO Lif Termal özellikleri

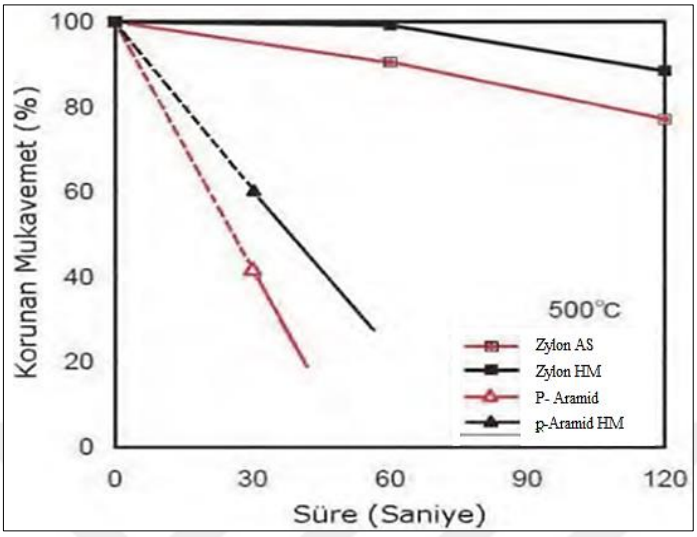
PBO lifleri yapısının rijit dağılımı nedeniyle, yüksek mukavemet ve yüksek modülün yanı sıra mükemmel sıcaklık dayanımı sergilemektedir. PBO lifleri yüksek sıcaklıklara kadar dayanır ısı iletimleri de oldukça hızlıdır ve kolayca erimemektedir (Kalaycı ve ark., 2015b)

PBO liflerinin bozunma dayanımı sıcaklıkları literatür çalışmalarında farklı sıcaklıklar olarak belirtilmiştir; 550 ^{0}C den itibaren (Lewin, 2006) yada 650-700 ^{0}C sıcaklık aralıklarında değişik sıcaklıkta bozunmaya başladığı bildirilmiştir (Kalaycı

ve ark., 2015b). Argon gazı bulunan ortamda 700 ^{0}C de ağırlığının %100 yakınını koruduğu ve bozunmadığı görünürken hava bulunan ortamlarda 700 ^{0}C de ağırlığının yaklaşık olarak %80 nini korumaktadır. Hava bulunan ortamda sıcaklık 1000 ^{o}C'e çıkartıldığında PBO liflerinin ağırlıklarının sadece %28'ini kaybettiği ortaya koymuşlardır (Kalaycı ve ark., 2015b).

PBO lifleri, aramid lifleri ile karşılaştırıldıklarında 700 ^{o}C'de hava bulunan ortamda %100'üne yakını bozunan aramid lifleri argon gazı olduğu ortamda ağırlığının %50'ye yakın bir bölümünü muhafaza etmektedir. Özellikle 500 ^{o}C'den sonra PBO lifleri ve aramid aralarında büyük derecede ağırlık kaybı farkı görülmektedir (www.toyobo-global.com, 2019).

Termogrovimetrik analiz yöntemi ile PBO liflerinin de dahil edildiği yüksek performans liflerin (Terlon®, UHMW-PE (ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen), para-aramidler, Twaron®) hava ve nitrojen gazı bulunan ortamda termal dayanımlarındaki değişim değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme sonuçlarında PBO' nun diğer yüksek performans tekstil liflerinden daha yüksek termal bozunma sıcaklığına dayanımı olduğu ancak aktivasyon enerjisinin hem nitrojen hem de hava bulunan ortamda en yüksek değerde olmadığı ortaya koyulmuştur (Şekil 3.17) (Hu, 2008).



Şekil 3.17. 500°C sıcaklık altında işlem gören PBO ve aramid liflerinin korunan mukavemet yüzdeleri (Kalaycı ve ark., 2015b; www.toyobo-global.com, 2019).

Alev dayanımı

PBO lifleri oldukça yüksek derece alev dayanımı sergilemektedir. PBO liflerinin LOI yanma dayanımına göre karşılaştırılması aşağıdaki Tablo 3.14'da verilmiştir.

Tablo 3.14. Bazı yüksek performans liflerinin LOI değerlerine göre karşılaştırılması (Kalaycı ve ark. 2014; Hearle; 2001;Lewin, 2006; www.toyobo-global.com, 2019; Bourbigot ve ark.2003).

Lif tipi	**LOI (%)**
PBO	68
ρ-Aramid	29
PBI	41
HPPE (Yüksek performanslı polietilen)	20'den az
M-5 Lifleri (polypiridobisimidazol, PIPD)	50'den fazla

PBO Lifi Mekanik Özellikler

PBO lifleri mekanik açıdan yüksek dayanıma sahip olması diğer yüksek performans lifler arasında ön plana çıkartmaktadır. Gerek yoğunluğunun düşük

olması gerekse elastik modülünün aramid lifleri ve karbon liflerinden yüksek olması kullanım alanı olarak mekanik dayanım da ön plana çıkartmaktadır. PBO liflerini aramid karbon ve M5® lifleri ile bazı mekanik özelliklerin karşılaştırılması Tablo 3.15' de verilmiştir.

Tablo 3.15. Yüksek Performanslı Liflerin Mekanik ve Fiziksel Özellikleri karşılaştırılması (Sikkema ve ark., 2003)

Özellikler	Lif çeşitleri			
	Aramid Lifleri	Karbon Lifleri	PBO Lifleri	M5® Lifleri
Mukavemet (özel kuvvet) (GPa)	3,2	3,5	5,5	5,0
Uzama (%)	2,0	1,5	2,5	1,5
Elastik modül (GPa)	115	230	280	330
Basınç dayanımı (GPa)	0,58	2,10	0,40	1,70
Yoğunluk (g/mL)	1,45	1,80	1,56	1,70

3.4.3. PBO lifinin balistik amaçlı kullanımı

PBO lifleri balistik amaçlı koruması, bıçak darbelerine, kesici malzemelere karşı koruma amaçlı ve sıcak ya da alev direnci gereken yerlerde koruma sağlamak amaçlı kullanımları mevcuttur. PBO liflerinin literatür çalışmaları göz önüne alındığında birçok başarılı sonuç elde edilmiştir. PBO liflerinin balistik korumasını daha da iyileştirmek amaçlı birçok çalışma yapılmıştır. Aramid gibi bazı yüksek performans liflerden daha üstün dayanım sağladığı için 1998-2003 yılları arasında birleşmiş milletlerin (U.S.) polisinin balistik amaçlı koruyucu yeleklerinde kullanılmıştır (Kalaycı ve ark. 2015b; Frame ve Hansen, 2002; Behera ve Dash, 2013; Oğlakçıoğlu ve ark., 2014; en.wikipedia.org,2020c). Ancak 2003 yılında yaşanan iki polis memurunun farklı zaman ve yerde çelik yelek (koruyucu yelek) giymelerine rağmen yaralanma ile sonuçlanan olaylar neticesinde, PBO liflerinden üretilmiş olan çelik yeleklere (koruyucu yeleklere) oluşmuş büyük güvenin sarsılmasına sebep olmuştur (O'Neil,2006). Bu olayı aydınlatmak için birçok araştırma gerçekleştirilmiş ve sonuç olarak; PBO liflerinin nemden ve güneş

ışığından etkileneceği bu sebepten dolayı liflerin zamanla bozunduğu, ilk zamanda sahip olduğu koruma seviyesini zamanla yitirdiği rapor edilmiştir (Kalaycı ve ark. 2015b; O'Neil,2006; en.wikipedia.org, 2020c). Ayrıca bu liflerin tıpkı Kevlar® ve UHMWPE (ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen) liflerinde olduğu gibi yüksek hızla çarpan merminin liflerde kesilme meydana getirdiği raporlanmıştır (Kalaycı ve ark. 2015b; Çerkez ve Ulcay, 2007; Cheeseman ve Bogetti, 2003). Bu olayın tespitinden sonra PBO (Zylon®) içeren koruyucu yelekler piyasadan toplatılmıştır (Kalaycı ve ark. 2015b). 2005' in başlarında mevcut PBO liflerinden üretilmiş yelekler tekrar gündeme gelmiş ve kullanım ömürleri 60 aydan 30 aya düşürülmüş ancak buna rağmen bu yeterli görülmemiş 2005 in ağustos ayında (Amerika birleşmiş Milletleri) USA'de PBO lifinden üretilen koruyucu yeleklerin üretimi durdurulmuştur (Kalaycı ve ark. 2015b; en.wikipedia.org, 2020c).

PBO liflerinin nemden ve güneş ışığından korunduğu takdirde balistik koruma özellikleri bakımından oldukça iyidir (Kalaycı ve ark. 2015b). Bundan dolayı PBO liflerinin dayanım ömürlerini uzatmak için nano-parçacık (ZnO, Silica ve CNT) ilavesi ve yüzey kaplama yöntemleri gibi bazı geliştirilmiş sistemsel çalışmalar mevcuttur (Yumak ve ark., 2013)

Başka bir çalışmada PBO liflerinin yapısının korumasını incelemek amaçlı; Amerikan ordusunda savunma sanayisinin LOSAT KEM adlı tanksavarlarını şarapnel parçaların dan koruyan üst seviye kaplama yüzeyi geliştirmek için yapılmış araştırmada, PBO ya da aramid liflerinden oluşturulmuş dokusuz yüzeylerin dokuma ile elde edilmiş kumaş yüzeyleri ile karşılaştırılmasında daha üstün özellikte şaraplen veya parçacık koruması sağladığı ortaya koyulmuştur (Kalaycı ve ark. 2015b; Wilusz, 2008). Şekil 3.18' de (a) Darbe hasarı sonrası 3 katmanlı iki boyutlu PBO (Zylon®) lifli kumaş, (b) Darbe hasarı sonrası PBO lif içeren balistik koruma sağlayan yelek (c) 3 boyutlu ortogonal PBO (Zylon®) lifli kumaşların kurşun etki etmesi halindeki görünümleri verilmiştir.

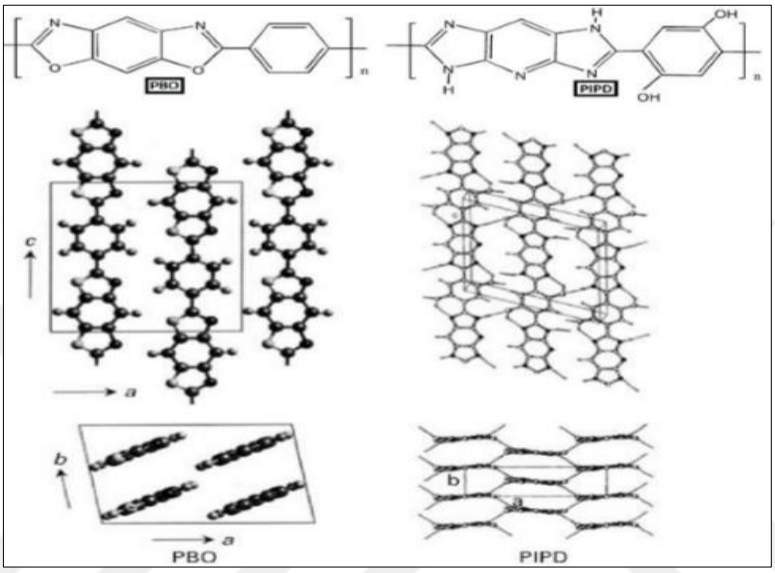


Şekil 3.18. a) Darbe hasarı sonrası 3 katmanlı iki boyutlu PBO (Zylon®) lifli kumaş, b) Darbe hasarı sonrası PBO lif içeren balistik koruma sağlayan yelek (Kalaycı ve ark. 2015b), c) 3 boyutlu ortogonal PBO (Zylon®) lifli kumaş (Behera ve Dash, 2013; Yumak ve ark. 2013)

3.5. PIPD (Poli(Piridobisimidazol)) (M5®) Lifi

PIPD polimerinden [poli 2,6-diimidazo[4,5-b:4',5'e]piridinilen-1,4 (2,5-dihidroksi)fenilen] (Şekil 3.19) üretilen PIPD lifleri de yüksek performanslı lifler adı altında ki lif türlerindendir (Warheit ve ark. 2007; Horrocks ve Price, 2008; Mittal, 2011). Ticari olarak M5® markası adı altında bilinmekte olan bu lif günümüzde DuPont ile ortak firma olan United States Magellan Systems International LLC tarafından ürtimi sağlanmaktadır (Bunsell, 2009; www2.dupont.com, 2019). Hem yüksek mukavemet özelliği hem de yüksek ısıya dayanıklılığı olduğundan adı genellikle yüksek mukavemetli, yüksek performanslı lifler adı altında yer almaktadır (Kalayci ve ark. 2015a; Warheit ve ark. 2007; www2.dupont.com, 2019). PIPD lifleri sahip oldukları yüksek performanslı özelliklerinden dolayı balistik koruma sağlayan sert ve yumuşak zırhlar, ağırlıkça hafif kompozitler, sıcaktan (ısıdan) ve alevden koruyan kıyafetler, yüksek mukavemetli kablolar gibi olmak üzere birçok teknik tekstil malzemesi olarak kullanılmaktadır (Kalayci ve ark. 2015; Mittal, 2011; So ve ark., 2003). PIPD polimeri ilk olarak 1990'larda Dr. Sikkema ve ekibi tarafından Akzo Nobel araştırma merkezinde sentezlenmiştir (Kalayci ve ark. 2015a; Warheit ve ark. 2007; Sikkema ve ark., 2003; Lammers, 1998; Eichhorn ve ark., 2009a; Chae ve Kumar, 2006; Committee on Opportunities in Protection Materials Science and

Technology for Future Army Applications, 2011; Gupta, 2008). PIPD ve PBO polimerlerinin kimyasal formülleri ve bu polimerleirn kristalin yapısı Şekil 3.19 da verilmiştir.

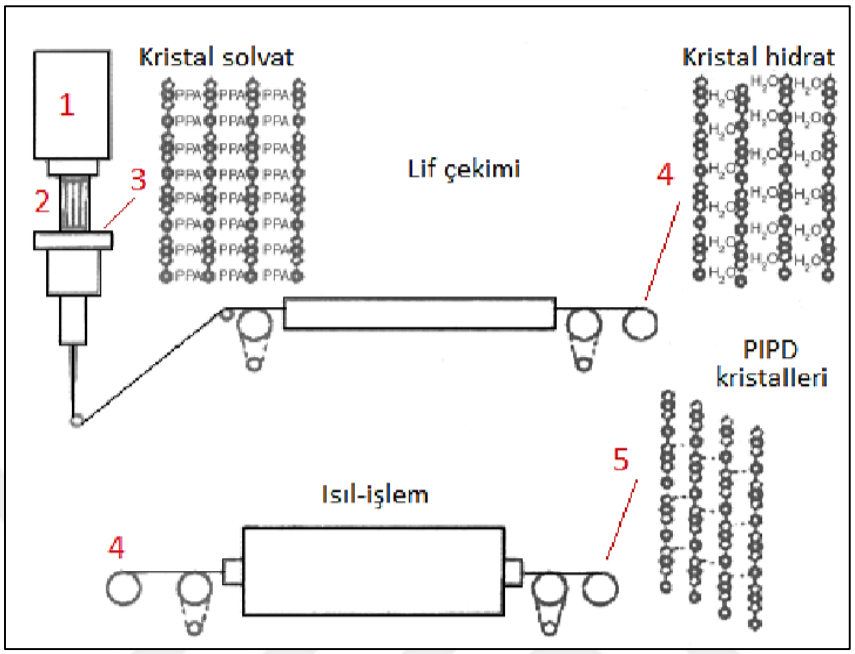


Şekil 3.19. PIPD ve PBO polimerlerinin kimyasal formülleri (Gupta, 2008; Mckenna ve ark., 2004; Cervenka ve ark.2005) ve bu polimerlerin kristal yapısı (Bunsell, 2009)

3.5.1. PIPD Lif Çekimi ve Lif Özellikleri

PIPD liflerinin üretiminde konvansiyonel hava boşluklu yaş çekim yöntemi (kuru-jet yaş lif çekim yöntemi) kullanılmaktadır (Mittal, 2011; Bunsell, 2009; Eichhorn ve ark., 2009a; Afshari ve ark., 2008; Cunniff ve ark., 2002). Şekil 3.20'de lif çekim basamakları gösterilmiştir. İlk işlem lif çekim çözeltisini 180 ^{o}C' ye ısıtılmasıdır. Bu sıcaklıkta çözelti nematik fazdadır (Mittal, 2011) Lif çekim işlemi için hazırlanan polimer çözeltisi düzelerden çekildikten sonra 180-190^{o}C'de hava ortamından su ya da seyreltilmiş fosforik asit bulunan koagülasyon banyosuna alınmaktadır (Kalaycı ve ark., 2015a; Mittal, 2011; Bunsell, 2009; Kalaycı ve ark., 2014). Çözelti düzelerdeyken ve hava boşluğuna ilk girdiği anda nematik halindeki

çözelti yerini oryante olmuş nematik halindeki çözeltiye bırakır. Sonrasında çözeltinin soğutulması işlemi ile birlikte nematik faz kristal solvat faza dönüşür, daha sonra lifler koagüle olur (katılaşır) ve yıkanır (Lammers ve ark., 1998) sonrasında yıkanırken kristal solvat faz içerisindeki polifosforikasit (PPA) su ile yer değişmektedir ve yapı Şekil 3.20'de gösterilen kristal hidrat formuna dönüşmektedir. Ilık bir soğutma işlemi uygulandıktan sonra yapının içerisinde yine de su molekülleri bulunmaktadır (Kalaycı ve ark., 2015a; Mittal, 2011; Lammers ve ark., 1998). Bu durumdaki lifler "as-spun" lifler olarak adlandırılmaktadır. Isıl işlemler esnasında kristal formun içindeki su molekülleri uzaklaştırılmaktadır ve susuz PIPD yapısı oluşmaktadır. Isıl işlemler basamağındaki liflere uygulanan ısıl işlemin sıcaklığı gereğinden düşük olursa veya uygulanan ısıl işlem süresi kısa tutulursa, kristal hidrat formundan PIPD kristallerine geçişi olmayabilir, bozulabilir ve tersine çevrilebilmektedir (tersinebilmektedir) (Kalaycı ve ark., 2015a; Mittal, 2011; Lammers ve ark., 1998). Isıl işlemler sonucunda ortalama 10 mm çapında parlak mavi lifler elde edilmektedir (Kalaycı ve ark., 2015a; Mittal, 2011;, Montes-Moran ve ark. 2002; En.Wikipedia.Org, 2020a). Bu üretim proseslerine ek olarak PIPD liflerinin mekanik özelliklerini daha da iyi hale getirmek için azot gazı altında yüksek sıcaklık altında gerilim işlemi uygulanarak kısa süreli germe işlem basamağına tabi tutulmuş olmaktadır (Mittal, 2011; Bunsell, 2009; En.Wikipedia.Org, 2020a). Bu işlem basamağı sayesinde PIPD liflerin atomik yapısı, basma dayanımı ve kopma mukavemeti için daha iyi düzen haline geçmektedir (En.Wikipedia.Org, 2020a). 400 ^{o}C sıcaklık altında gerçekleştirilmiş bir çekme-germe işlemi sonrasında mekanik özelliklerinde ciddi oranda bir gelişme görülen PIPD liflerinin modülleri 150-195 GPa' dan 320-360 GPa' a yükselirken, mukavemet değerlerinde ise 2,5 GPa'dan 5,5 GPa'a yükselme raporlanmıştır (Bunsell, 2009; Eichhorn ve ark. 2009a; Cunniff ve ark., 2002; Montes-Moran ve ark., 2002)



Şekil 3.20. PIPD polimerinden lif çekimi basamakları sırasında lif yapısının oluşum şeması:1-nematik faz, 2-oryante olmuş nematik faz, 3-kristal solvat, 4-kristal hidrat, 5-susuz yapı (Mittal, 2011; Lammers ve ark., 1998)

3.5.2.PIPD Liflerinin Özellikleri

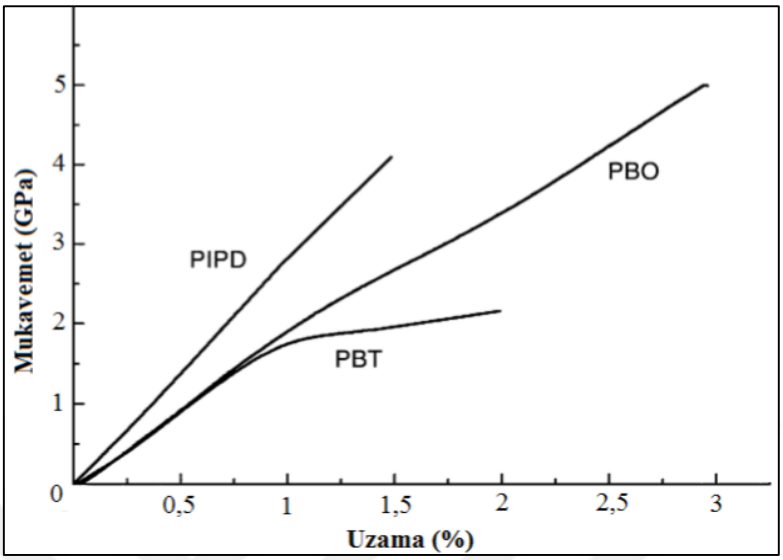
PIPD liflerinin mekanik özellikleri, ısıl ve alev dayanımları ve diğer belli başlı özellikleri bu başlık altında anlatılmıştır.

Mekanik Özellikleri

Rijit-rod polimer yapısında bulunan PIPD lifleri bu yapıdaki diğer teknik liflerde olduğu gibi yüksek mukavemet ve modüllüdür. PIPD polimer yapısının polimer zincirleri arasındaki bulunan çok yönlü hidrojen bağları sayesinde sahip olduğu yüksek basma direnci ve kayma direnci dayanımı ile diğer liflerden farklılaşmaktadır. PIPD lifleri 1-1.75 GPa basma dayanımı ile teknik tekstil liflerinin içinde bugüne kadar bilinmekte olan en yüksek basma dayanımına sahip liftir (Sikkema ve ark. 2003; Chae ve Kumar, 2006;, Montes-Moran ve ark., 2002;

Hearle, 2008;, Elices ve Llorca, 2002; Denchev ve Dencheva, 2012; Lin ve ark., 2008; Mortensen, 2006; Afshari ve ark., 2008; Zhang ve ark., 2007, Kalaycı ve ark. 2015a'dan; Houcks, 2009) PIPD liflerinin mekanik özellikleri teknik tekstil liflerinden yüksek performanslı lifler ile karşılaştırıldığında diğerlerinden daha üstün mekanik özellikleri bulundurduğu görülmüştür (Zhang ve ark., 2007, Kalaycı ve ark. 2015a' dan). Örneğin PIPD liflerinin kopma mukavemeti (3,5-6 GPa) (Kalayci ve ark., 2015; Bunsell, 2009; Kitagawa ve ark., 2014; Lesser, 2005) birçok Aramid (Kevlar®, Twaron®) 2,8-3 GPa (Kalayci ve ark., 2015)) ve UHMWPE (Dyneema®, Spectra®) 3-3,5 GPa (Kalayci ve ark., 2015) liflerinden daha yüksektir (En.Wikipedia.Org, 2020a). Ayrıca PIPD lifleri Aramid liflerinin basma dayanımından yaklaşık olarak 2 kat daha fazla dayanım göstermektedir (Houcks,2009).

PIPD lifleri ile yüksek mukavemetli karbon lifleri karşılaştırıldığın da, PIPD liflerinin %20-40 daha yüksek başlangıç modülüne (300-360 GPa) (Gupta, 2005; Lesser, 2005) ve %40-60 daha yüksek mukavemete (Kalayci ve ark., 2015; Afshari ve ark., 2008; Kitagawa ve ark., 2014; Rice ve ark., 2014; Sirichaisit ve Young, 1999) özelliği gösterdiği kaydedilmiştir. Ancak karbon liflerine göre daha kırılgan yapıya sahiptirler ve gerilmeye maruz kaldıklarında kalıcı deformasyona uğramaktadır (En.Wikipedia.Org, 2020 a). Şekil 3.21'de PIPD liflerinin diğer yüksek performans lifleri olan PBO ve PBT lifleri ile mukavemet karşısında uzama grafiği verilmiştir.



Şekil 3.21. PIPD PBO ve PBT liflerinin mukavemet- uzama grafiği (Leal ve ark., 2007)

Yapısındaki benzerlikleri açısından mekanik ve termal özellikleri bakımından PBO lifleri ile de sıkça karşılaştırılmış olan PIPD liflerinin modülü bu liflerden biraz yüksek olması nedeniyle, PIPD liflerin mukavemeti PBO liflerinin mukavemetinden çok az seviyede düşük olmaktadır (Tablo 3.16) (Committee on Opportunities in Protection Materials Science and Technology for Future Army Applications, 2011; Kitagawa ve ark., 2014). Ancak bu lif üzerinde geliştirmeler devam ettiğinden dolayı değerlerin daha yüksek seviyelerde elde edileceği düşünülmektedir (Kalaycı ve ark.2015a; Gupta, 2008). Tablo 3.16'de PIPD liflerinin PBI PBO ve HPPE lifleri ile bazı mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır.

Tablo 3.16. PIPD lifleri ile diğer yüksek performans lifleri ile karşılaştırılması (Kalaycı ve ark., 2015a)

Lif Cinsi	Kopma anında uzama (GPa)	Kopma mukavemeti (GPa)	Başlangıç modülü (GPa)	Yoğunluk (g/cm^3)
PIPD (Poli-piridobisimidazol) Lifleri	1,5-2,5	3,5-6	330-360	1,70
PBI (Poli-benzimidazol) Lifleri	28-30	0,4	5,6	1,3-1,43
PBO (Poli-pfenilenbenzobisoksazol) Lifleri	2,5-3,5	5,6-5,8	180-280	1,5
HPPE (Yüksek Performanslı Polietilen) Lifleri	2,5-4	2,4-3,1	70-105	0,97

Oldukça yüksek maliyetli bir malzeme olan PIPD polimerleri ve liflerinin basma özellikleri suya karşı dayanımda büyük düşüşe neden olup hassasiyet göstermektedir. Su ile temas halinde olan PIPD liflerinin basma özellikleri zamanla azalmaktadır (Denchev ve Dencheva, 2012).

Ancak, PIPD lifleri gerilim altında yeniden tavlama işlemine tabii tutularak başlangıcında sahip olduğu hidrojen bağları seviyesini ve basma dayanımını korunabilmektedir (Kalaycı ve ark., 2015a; Denchev ve Dencheva, 2012).

PIPD Liflerin Isı ve Alev Dayanımı

Tüm rijit-rod polimerik liflerde olduğu gibi PIPD lifleri de yüksek alev direncine sahiptir (Horrocks ve Price, 2008; www2.dupont.com, 2019; Bourbigot ve Flambard, 2002; Northolt ve ark. 2002). Tam bir erime noktasının olmayışı, yapısında bulunan molekül zincirlerinin rijitliği ve zincirler arası güçlü etkileşimi bu liflerin yüksek alev dayanımının nedeni olarak kabul edilmektedir (Kalaycı ve ark., 2015a; Horrocks ve Price, 2008; Bourbigot ve Flambard, 2002; Bourbigot ve ark. 2003). Hava ortamında yanmayan PIPD lifleri aynı zamanda kendi kendine sönebilme kabiliyetindedir (Bourbigot ve Flambard, 2002; Bourbigot ve ark. 2003) . Yanma olayı için gerekli olan oksijen değeri (LOI) 25 degerinden yüksek

olan lifler güç tutuşur lif olarak bilindiğinden PIPD lifleri de (LOI) 50'den yüksek olması bakımından termal dayanımı oldukça yüksek lifler kategorisindedir (Tablo 3.17) (Bourbigot ve Flambard, 2002). Bazı yüksek dayanımlı liflerin LIO dayanımları Tablo 3.17'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 3.17. LOI değerleri yüksek bazı lifler. (Bourbigot ve Flambard, 2002)

Lif cinsi	LOI	Bozunma sıcaklığı (ºC)	Nem geri kazanım (%)
HPPE (Yüksek Performanslı Polietilen) Lifleri	16	150	–
PBO (Poli-pfenilenbenzobisoksazol) Lifleri	68	550-650	0,6-3
PBI (Polibenzimidazol) Lifleri	41	450-550	15
PIPD (Polipiridobisimidazol) Lifleri	>50	500	4,5
Aramid Lifleri (Kevlar®)	30	550	3-3,5

PIPD liflerinin ısı salım hızı 44 kW/m2 ve tutuşma süresi 77 saniye, PBO liflerinin ısı salım hızı 48 kW/m2 ve tutuşma süresi 56 saniye, p-aramid liflerinin ısı salım hızı 205 kW/m2 ve tutuşma süresi 20 saniye olarak ölçümü yapılmıştır (Bourbigot ve Flambard, 2002). Bu değerlendirmeler PIPD liflerin yüksek termal dayanım özelliklere sahip olduğunu onaylar niteliktedir (Kalaycı ve ark., 2015a; Bourbigot ve Flambard, 2002; Bourbigot ve ark. 2003). Buna ek olarak ani alevlenme (flashover) durumuda dahil olmak üzere birçok yanıcı ve alevlenici ortamda yanmadığı ve duman üretmediği ya da çok az miktarda ürettiği gözlemlenmiştir (Horrocks ve Price, 2008; Bourbigot ve Flambard, 2002; Bourbigot ve ark. 2003). PIPD (M5®) liflerinin, aleve dayanımı ile bilinen PBO ve aramid liflerinden (Kevlar®, Twaron®, Nomex® lifleri) daha yüksek ısı ve alev dayanımına sahip olduğu, hatta bugüne kadar geliştirilmiş organik lifler arasında alev dayanımı en yüksek lif olduğu belirtilmektedir (Kalaycı ve ark. 2015a;

Horrocks ve Price, 2008; En.Wikipedia.Org, 2020a; Bourbigot ve Flambard, 2002, Northolt ve ark., 2002; Zhu ve Young, 2006) .

3.5.3. PIPD Liflerinin Diğer Özellikleri

PIPD liflerinin üstün mekanik özellikleri ve yüksek termal dayanımının yanında UV ışın dayanımına karşıda iyi seviyededir. Yapısal olarak benzerlik taşıdığı PBO lifleri ile karşılaştırıldığında, UV ışınlarına ve neme karşı hassasiyet içeren PBO liflerine göre PIPD (M5) liflerinin UV ışınına ve neme karşı dayanımlarının iyi oluğu yapılan çalışmalar sonucu belirtilmiştir (Kalaycı ve ark., 2015a, Mittal, 2011; Afshari ve ark., 2008).

Bunun yanı sıra PIPD Lifleri oldukça yüksek darbe direnci ve kesilme dayanımına sahip olan PIPD lifleri özellikle balistik ürünler açısından hammadde malzemesi olarak ön plana çıkmaktadır (Afshari ve ark., 2008, Zhu ve Young, 2006). PIPD lifleri balistik amaçlı kullanım için UV dayanımından ve nem direncinden dolayı karşılaştırıldıklarında PBO liflerinden üstünlük sağlamışlardır. (Kalaycı ve ark., 2015a)

3.5.4. PIPD Liflerin kullanım alanları

Basma dayanımı yüksek olan liflerden biri PIPD lifleridir. Yüksek mukavemet özelliklerinin yanı sıra termal özelliklerinin de iyi olması sayesinde koruyucu teknik tekstiller başta olmak üzere, alev dayanımı yüksek, aşınma direnci yüksek yerlerde, balistik olarak askeri alanlarda, spor teknik tekstilleri hatta endüstriyel ve taşımacılık teknik tekstillerinde de kullanım alanlarına sahiptir (Kalaycı ve ark 2015a).

Balistik amaçlı kullanım özelliklerinin iyi düzeyde olması, ısıya ve aleve karşı üstün dayanıma sahip olması ile beraber UV ışınlarına ve neme karşı hassasiyetlerinin az olması PIPD liflerini yüksek performanslı lif pazarında öne çıkan bir hammaddesi haline getirmektedir (Bhatnagar, 2016). Bu lifler; balistik amaçlı koruyucu sert ve yumuşak zırhlar, ağırlıkça hafif kompozitler şeklinde;

asker, polis, ya da itfaiyeci kıyafetleri gibi kişisel koruma ürünleri; yüksek mukavemetli kablolar, spor tekstilleri, endüstireyel çalışanların kıyafetleri ve uzay uygulamaları başta olmak üzere birçok teknik tekstil olarak üretilen ürünlerde kullanılabilmektedir. Balistik özellikleri açısından Amerika Birleşik Devletleri ordusu ve Natick Askeri Merkez laboratuvarları tarafından yapılan testler yeni yüksek performanslı lifin balistik amaçlı üretilecek ürünlerde kullanımında iyi bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymuştur (Kalaycı,2015a). Özellikle balistik koruma amacı ile üretilmiş zırhlar için Kevlar®, PBO, HPPE (Yüksek performanslı polietilen) gibi liflere bir alternatif oluşturmaktadır (Holmes ve ark., 2006).

3.6. UHMWPE (Ultra High Molecular Weight Polyethylene (Ultra Yüksek Molüküler Ağırlıklı Polietilen) Lifleri

Polimerik lifler, önceleri mekanik özellikleri açısından cam ve karbon liflerinden zayıf özellikler sergilemekteydi. Solvent esaslı eğirme sistemleri, ultra mukavemetli polimer lif ürünlerinin gelişimine imkân sağlamıştır. Bu lifler iki gruptur; birinci grup, sert çubuk molekül yapılıdır. İyi bilinen ürün markaları Kevlar®, Twaron® ve Zylon®' dır. Bu liflerin moleküler zincir yapıları bir miktar bükülmede sert davranış özelliği göstermektedir. İkinci grup olarak ise yüksek elastikite özelliğine sahip olan polietilen moleküllerinden oluşmaktadır (Hearle,2001). İyi bilinen önemli ticari isimlerinden birisi DSM'den Dyneema®' dır. DSM firması Dyneema® teknoloji lisansını Honeywell firmasında Spectra® ürünü içinde kullanıma vermiştir.

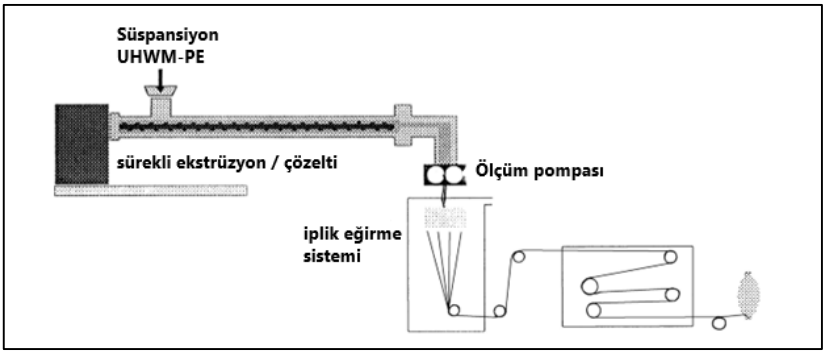
Dyneema®, ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE) olarak üretilen bir lif ve kompozit ürün markasıdır. UHMWPE Jel iplik eğirme yöntemi ile saf olarak üretilmektedir. Dyneema®, yüksek performanslı polietilen (HP-PE) düşük ağırlık, son derece yüksek mukavemet, esnek hareket kabiliyeti ve yüksek enerji absorbe etme kabiliyetini bir araya getirmiş lif veya kompozit ürün çeşididir.

3.6.1. UHMWPE (Ultra Yüksek Moleküler Ağırlıklı) Liflerin Üretim Prosesleri

Ultra yüksek moleküler ağırlıklı (UHMWPE) liflerinin temeli, 1960'larda, UHMWPE için sıralı dizilim olarak "şiş-kebab" olarak adlandırılmış yeni kristal fibril bir formunun DSM araştırma laboratuvarında keşfedilmesiyle oluşmuştur (Werff ve Heisserer, 2016).

1970' li yılların başlarında aramid lifinin geliştirilmesi ile, esnek makro moleküller esaslı yüksek performanslı lifler için üretim yöntemlerinin gerçekleştirilmesiyle, DSN research' de 1970'lerin sonunda bir atılım gerçekleşmiştir (Peijs, 1993).

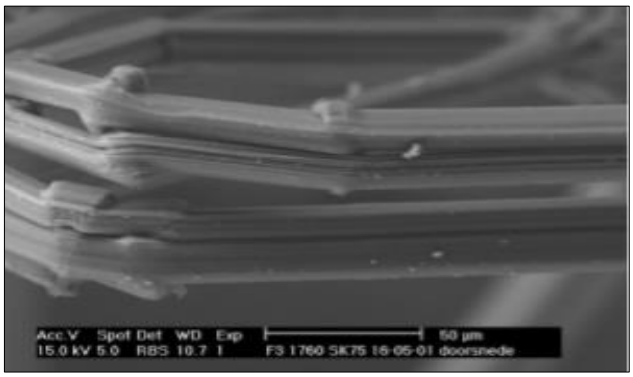
DSM ve Pennings tarafından ''jel iplikçilik'' eğirme yönteminin keşfi yüksek mukavemetli ve yüksek modüllü UHMWPE liflerinin ticari ölçekli üretimine imkân vermiştir. DSM' nin lifleri ve kompozitleri Dyneema® markalıdır. Spectra® markasını kullanan Allied Signal'a (şimdiki Honeywell firması) bir teknoloji lisansını DSM tarafından verilmiştir. Yüksek mukavemetli ve yüksek moleküler ağırlıklı UHMWPE lif üretimi için bir jel eğirme yönteminin akım şeması örneği, Şekil 3.22'de şematik olarak verilmiştir (Werff ve Heisserer, 2016).



Şekil 3.22. Jel iplik eğirme işleminin şematik gösterimi (Werff ve Heisserer, 2016).

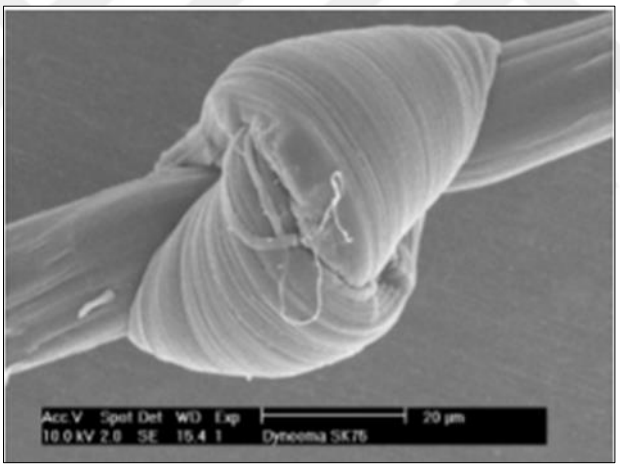
Bu eğirme ve çekme işlemi, yaklaşık 101 GPa young modülü ve yaklaşık 2,9 GPa gerilme mukavemetine sahip olan yüksek performanslı polietilen (HP-PE) liflinin üretimi ile bitmektedir. (Werff ve Heisserer, 2016).

Jel eğirme işleminde, bir çözücü içinde UHMWPE tozlu süspansiyon, ısıtarak çözen bir ekstrüdere beslenmektedir. Eğirme çözeltisi iplik eğirme sistemine beslenir ve eğirme deliklerinden çıkışı sağlanır. Lif oluşumu UHMWPE'nin eğrilmiş malzemesinin soğutulmaya zorlanması ile oluşmaktadır. Üretilen lifler yoğun sıcak çekme işlemine ve çözücü artığının uzaklaştırılmasına (buharlaştırma ve özümsenme yolu ile) tabi tutulmaktadır. Eğirmenin bir sonucu olarak polimer zinciri başına molüküler dolaşma sayısının azalması nedeniyle polietilen zincirleri arasındaki düşük etkileşim, çok yüksek çekme oranlarına ulaşılabilmektedir. Çok yüksek çekme oranı oldukça yüksek moleküler oryantasyona ile böylece yüksek mukavemetli lif ve yüksek modüle sebep olmaktadır (Werff ve Heisserer, 2016). Sert çıkıntılı lifler daha fazla zincir-zincir etkileşimi gösterir, çünkü bunlar hidrojen köprüler içermektedir. Vander-Waals bağları ve UHMWPE zincirleri arasındaki kristalin etkileşimler hidrojen bağlarından çok daha zayıftır. Şekil 3.23' de sıkıştırma yüklü jel bükülmüş UHMWPE liflerindeki bükülme bantlarının SEM resmi gösterilmiştir (Marissen, 2011).

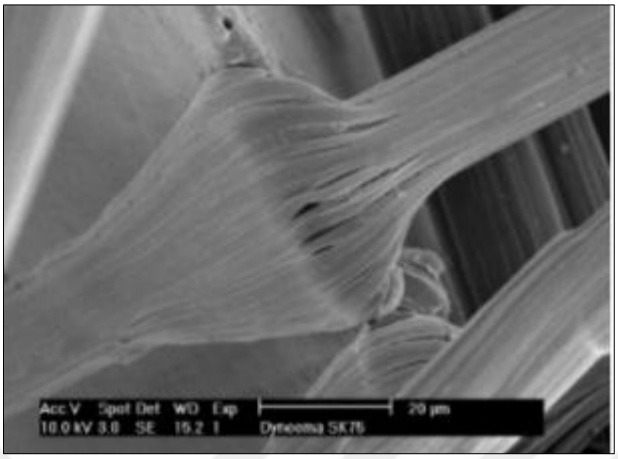


Şekil 3.23. Sıkıştırma yüklü jel bükülmüş UHMWPE liflerindeki bükülme bantlarının SEM resmi (Marissen, 2011).

Yüksek mukavemetli polimer lif, kırılma dayanımının yanı sıra sıkışma verimi gösterecektir. Bu etkiler yük altında önem teşkil etmektedir. Şekil 3.24'de tek bir Dyneema® lifinin düğümünün SEM resmini verilmiştir. Lifte aşırı eğrilik ve enine deformasyon oluşumları varolabilir, ancak gerilme kırılmaları olmamıştır. Şekil 3.25' de, tıraş bıçağının kesme kenarı boyunca gerilmiş bir Dyneema® filamentini göstermiş ve yine aşırı eğrilik meydana gelmiştir. Filamentler enine yönde deforme olup ve kesilmesi yerine bıçak üzerine yayılmaktadır (Marissen, 2011). Bununla birlikte, jel ipekli UHMWPE lifi, belirgin bir erime olmadan da kaynaşma sağlamaktadır. Bu kaynaşma çok daha yüksek baınçlarda meydana gelmektedir. Bunun için 100 Bar'dan daha yüksek basınçlar seçilmelidir (Marissen, 2011).



Şekil 3.24. Dyneema® filamentindeki bir düğümün SEM resmi (Marissen, 2011).



Şekil 3.25. Bir tıraş bıçağının kesme kenarı boyunca gerilmiş bir Dyneema® filamentinin SEM resmi (Marissen,2011)

Bu yüksek perforamnslı lifin ana hammaddesi olan polietilen (PE) "en basit yapı taşı polimerdir". PE, sadece zincirlerde kovalent karbon bağları ve yan gruplar olarak hidrojen atomları vardır. Ester veya amid bağları gibi başka bağların olmaması, bu bağlarla ilgili özelliklerin olmadığını göstermektedir. Bu yüzden polietilen ve UHMWPE lifleri polar bir polimer değildir ve hidroliz reaksiyonuna karşı duyarsızdır. Bu kararlılığı iyi bir kimyasal direnç, reçinelere ve boyalara zayıf bağlanma sağlamaktadır. Bundan dolayıda, reçinelerle bağlanması veya liflere doygun renkler sağlama konusunda henüz başarılı olmamıştır (Marissen, 2011).

UHMWPE'nin ergime sıcaklığı yaklaşık 135˚C'dir ve ek olarak kristallerdeki moleküler zincirlerin oldukça uzunlamasına oryantasyona sahip olması, erime noktasının bir miktar artmasını (150°C) sağlamıştır. Bu değer uygulama alanını artırmakla beraber, yeni ve üstün işlem görme kabiliyeti sağlamıştır. Jelden büküm yolu ile üretilen UHMWPE lifi, erime noktası altındaki sıcaklıkta, basınç altında liflerin birleşimi sağlanmaktadır. Bu tarz sinterleme işlemleri, liflerde ufak bir lif özelliği kaybıyla "kompozit ürünlerde matrissiz kompozit" üretilmesine imkân vermektedir. Dyneema® lifi, Yüksek Performanslı Polietilen (HP-PE), düşük ağırlık, son derece yüksek güç, esneklik ve yüksek enerji emme kabiliyeti

özelliklerini bir araya getirmektedir. Bu özellikler, yapısal yüklerde kullanımını sınırlayan düşük sıkıştırma kuvvetine rağmen, darbeli yüklere maruz kalan kullanım için kompozit malzeme üretimine oldukça uygundur (Karbalaie ve ark., 2011).

Kompozit malzemelerde genel olarak balistik koruma ürünleri için iyi performans sağlamaktadır. Dyneema®, diğer kompozit malzemeler gibi yüksek mukavemet dayanımlarına sahiptir. Bu malzemeler zırhlar için zırhın arkasındaki dayanımının üstün koruma gereken askeri zırh sistemleri içinde çelikle veya seramikle sertleştirilmiş yüzeylerin bir alt tabakasında kullanımında balistik koruma malzemesine üstün performans sağlamaktadır (Karbalaie ve ark., 2011) .

3.6.2.UHMWPE (Dyneema® ve Spectra®) Liflerinin Özellikleri

DSM Yüksek Performanslı UHMWPE liflerini Dyneema® ticari lisanslı adı ile üretmekte ve bu ticari lisansın kullanımını Allied-Signal şimdiki Honeywell firmasıda UHMWPE Spectra® ticari isimli liflerine vermiş olup iki firma tarafından UHMWPE lifleri üretilmetedir. Tablo 3.18'de, yüksek molüküler ağırlıklı yüksek performans-polietilen (HP-PE) lifinin bazı yüksek mukavemete sahip liflerle karşılaştırılması verilmiştir. Karşılaştırmalı lif özellikleri göstermektedir ki; Dyneema® SK60 ve Dyneema® SK66, tipik diğer yüksek performanslı liflere göre üstünlük göstermektedir. Allied şimdiki Honeywell firması Spectra® 900 ve Spectra® 1000 liflerinin özellikleri, bu lifler sırasıyla Dyneema® SK60 ve SK66 ile karşılaştırıldığında özellikleri ticari lisansı Dyneema® ile aynı olduğu için listelenmemişti (Tablo 3.18)(Peijs, 1993). Mermi ve şarapnel parçalarının, kolluk kuvvetlerinin ve askeri personellerin hayatlarına yönelik birincil sebeplerde yer alması ve buna rağmen bıçaklanmalarda da gerçek bir yaralanma tehditi meydana getirmektedir. Aynı şekilde sadece kolluk kuvveti ve askeri personel değil bunlara ek olarak sağlık görevlileri, cezaevi görevlileri ve güvenlik personelleri gibi diğer yüksek riskli mesleklerde çalışan kişiler içinde tehlike arz etmektedir. Bu tehditler için üstün dayanım performansı sağladığı bilinmekte ve görülmektedir.

Tablo 3.18. UHMWPE (Dyneema®) liflerinin diğer bazı yüksek mukavemete sahip liflerle karşılaştırılması (Peijs, 1993).

Lif	Yoğunluk (g/cm^3)	Dayanım (GPa)	Modül (GPa)
Dyneema®SK60	0.97	2.7	90
Dyneema®SK66	0.97	3.0	100
Aramid-LM	1.44	2.8	60
Aramid- HM	1.45	2.8	120
Karbon-HS	1.78	3.4	230
Karbon-HM	1.81	2.7	390
E-cam	2.55	2.4	70
S-cam	2.50	3.5	85

Mekanik özellikleri

UHMWPE Lifleri, lif yönünde yüksek bir mukavemete ve yüksek bir modüle (deformasyona karşı dirence) sahiptir. Düşük yoğunlukta kombinasyon halinde, ağırlık bazında son derece yüksek bir mukavemet sağlayabilir ve bu da Dyneema® liflerini insan yapımı yüksek mukavemetli lif türlerinden biri yapmaktadır. DSM Dyneema®' da UHMWPE lifi, yüksek mukavemetli, düşük ağırlıklı, kopma dayanımında düşük uzama ve çoğu kimyasal maddeye dirençli temel özelliklere sahip, jel iplikli, çok filamentli bir liftir (www.dsm.com, 2019). UHMWPE lifi olan farklı özelliklerdeki Dyneema® lifi çeşitleri bulunmakta olup, özellikleri Tablo 3.19'da verilmiştir.

Tablo 3.19. UHMWPE olan Dyneema® lifleri (www.dsm.com, 2019).

UHMWPE (Dyneema ®) lif tipi	**Gerilme dayanımı**			**Gerilme modülü**			**Kopma uzama %**
	N/tex	g/den	GPa	N/tex	g/den	GPa	
SK99	4.3	48	4.1	159	1801	155	3-4
DM20*	3.2	36	3.1	96	1088	94	
SK75* SK78*	3.4-4.0	38-45	3.3-3.9	112-137	1267-1552	109-132	
SK60 SK62 SK65	2.3-3.4	28-38	2.4-3.3	67-102	759-1158	65-100	
SK38	1.7	19	1.6	35	396	34	6.5

*: Ayrıca, 'XBO dereceleri olarak da mevcuttur; XBO, bükülme yorulma performansını arttırmak için kullanılan bir kaplamadır

UHMWPE lifinin uzun vadeli statik yüklere maruz kalmaları, sürünme adı verilen kalıcı bir uzamaya yol açmaktadır. DSM Dyneema® lif tipleri, çeşitli statik yükleme koşullarında kullanılmasını sağlayan diğer yüksek mukavemetli liflerden daha yüksek sürünme direncine sahiptir (www.dsm.com, 2019). Bu life ait mekanik özellikler Tablo 3.20'de verilmiştir.

Tablo 3.20 Dyneema® liflerinin mekanik özellikleri (www.dsm.com, 2019).

Özellik-Birimi		**Değer**
Serbest kopma uzunluğu	Km	378
Eksenel çekme dayanımı	GPa	3.6
Eksenel çekme modülü	GPa	116
Eksenel basınç dayanımı	GPa	0.1
eksenel basınç modülü	GPa	116
Enine çekme dayanımı	GPa	0.03
Enine modül	GPa	3
Enine basınç dayanımı	GPa	0.1
Kopma uzaması	%	3-4
Kırılma çalışması	MJ /m^3	45-70
30° C ve 300MPa da sürünme (Sk75)	%/gün	0.02
30° C ve 300MPa da sürünme (SK78)	%/gün	0.006
30° C ve 300MPa da sürünme (DM20)	%/gün	0.00007

Termal özellikleri

Dyneema® lifleri diğer sentetik lifler gibi mekanik özellikleri sıcaklıklardan etkilenmektedir. Düşük ortam sıcaklıklarında dayanımı ve mukavemeti artarken yüksek sıcaklıklarda dayanım ve mukavemet özellikleri düşmektedir.

Uzun süre sıcaklığa mahruz kalma durumunda Dyneema® lifi, kriyolojik koşullarda 70°C sıcaklığa kadar kullanılabilmektedir (www.dsm.com, 2019). Dyneema® liflerinin termal özellikleri +23° C deki durumunun, kriyolojik sıcaklıktaki özellikleri ile karşılaştırılması Tablo 3.21' de verilmiştir. Genel olarak termal özellikleri ise Tablo 3.22'de gösterilmiştir.

Tablo 3.21. Dyneema® liflerinin mekanik özelliklerinin sıcaklıkla yüzde olarak değişimi (www.dsm.com, 2019).

Özellik	**Sıcaklık (°C)**			
	-60° C	+23°C (referans)	+60°C	+100° C
Çekme dayanımı	%110	%100	%80	%55
Çekme modülü	%110	%100	%85	%60
Kopma uzaması	%90	%100	%100	%105

Tablo 3.22. Dyneema® liflerinin termal özellikleri (www.dsm.com, 2019)

Özellik-Birimi		**Değer**
Erime aralığı	°C	144-152
Ayrışma sıcaklığı	°C	>300
Önerilen en düşük sıcaklık	°C	Limitsiz
Önerilen uzun süre sıcaklık limiti	°C	70
Önerilen kısa süreli sıcaklık limiti	°C	130
Önerilen kısa süreli sıcaklık limiti	°C	145
Lineer termal genleşme katsayısı	1/K	$-12x10^{-6}$
Özgül ısıl kapasitesi	J/kg.K	1850
Termal iletkenlik(Eksenel)	W/m.K	20
Termal iletkenlik (Enine)	W/m.K	0.2

Kimyasal direnç dayanımı

Dyneema® lifi kimyasallara karşı dayınımı yüksektir. Dyneema® lifi UHMWPE'den üretildiği için zarar verici ajanlar tarafından saldırıya yatkın

herhangi bir aromatik halka, herhangi bir amid, hidroksilik veya başka kimyasal grup içermemesi avantaj sağlamaktadır (www.dsm.com, 2019).

Fiziksel özellikler

Dyneema® lifleri düşük sürtünme katsayısı nedeniyle pürüzsüz bir yüzey hissi sağlamaktadır. Düşük yoğunlukta olması su üzerinde kalmasına olanak sağlamaktadır. Lifteki su emilimi önemsiz seviyededir (www.dsm.com, 2019). Dyneema® liflerinin fiziksel özellikleri Tablo 3.23'de verilmiştir.

Tablo 3.23. Dyneema® liflerinin fiziksel özellikleri (www.dsm.com, 2019)

Fiziksel özellik	**Birim**	**Değeri**
Doğal renk		Opak/beyaz
Yoğunluk	kg/m^3	970-980
Kristallik		<85%
Filament lineer yoğunluk	Dpf	1-3
Filament kalınlığı	µm	12-21
Filament kesiti	(diğer tipler)	Yuvarlak
Filament kesiti	(SK60-SK65)	Kemik şekli
Denge nemi yeniden kazanma		Yok
Su toplama		Yok
Kaynar suda büzülme >100°C		<%1
Histerezis kaybı faktörü	(23°C 5Hz)	0.02
Sürtünme katsayısı	(iplik üzerine iplik)	0.05-0.07

Optik özellikler

UHMWPE (Dyneema®) lifleri oak bir görüntüdedir. Lifler, floresans veya fosforesans olmadan kombinasyon halinde düşük UV absorpsiyon katsayısı nedeniyle UV-ışık kaynağında görünmez durumdadır. Düşük IR emme katsayısı ve yüksek termal iletkenlik kat sayısı nedeniyle termal görüntüleme cihazları için de görünmezlik sağlamaktadır. Radar dalgalarını düşük yansıtıcı özellikte olması radar kaynakları için azaltılmış görünürlük sağlamaktadır (www.dsm.com, 2019). Tablo 3.24' de optik özellikler verilmiştir.

Tablo 3.24. Dyneema®® liflerinin optik özellikleri (www.dsm.com, 2019)

Optik özellikleri	**Değeri**
Ultraviyole görünürlüğü	Şeffaf
Göz görünürlüğü	Şeffaf
Kızıl ötesine yakın görünürlük	Son derece şeffaf
Kızıl ötesi görünürlük	Son derece şeffaf
Radar görünürlük	Son derece şeffaf
Kırılma indeksi (eksenel)	1.59
Kırılma indeksi (enine)	1.53
Çift kırılma	0.06

Yanıcılık özellikleri

DSM firması Dyneema®® lifinden üretilen kumaşlar ve paneller için yanıcılık konusunda çeşitli standartlar getirmiştir. Diğer sentetik liflerde olduğu gibi, atmosferik şartlarda tutuşursa yavaşça yanar ve alevin uzaklaştırılmasından sonra kendi kendine sönebilecek niteliktedir (www.dsm.com, 2019) . Tablo 3.25'de tutuşurluk özellikleri verilmiştir.

Tablo 3.25. Dyneema® liflerinin tutuşurluk özellikleri (www.dsm.com, 2019)

Tutuşurluk	**Değeri**	
Sınırlı oksijen indeksi	<20%	
Kumaş, yatay	Std. No: FMVSS 302	Geçti (tutuşmadı)
Kumaş, dikey	Std. No: FAR 25.853b	Geçti (tutuşmadı)
Balistik panel, dikey	Std. No: DIN 4102	Geçti (tutuşmadı)

Yorulma dayanımı

Dyneema® lif ile yapılan uygulamalar, tekrarlanan eksenel yüklenmeye karşı diğer lif türlerinden daha yüksek bir dirence sahiptir. Yüksek modülüne rağmen lifler esnektir ve uzun yorulma ömrüne sahiptir. Düşük sürtünme katsayısı ve iyi aşınma direnci nedeniyle, lifler halindeki iç aşınması genellikle göz ardı edilmektedir (www.dsm.com, 2019).

3.6.3.UHMWPE (Dyneema®) Liflerinin Savunma Sanayinde Kullanımı

Dyneema® lifi çok amaçlı balistik koruma için, balistik kasklarda, yeleklerde ve kalkanlarda kullanılmaktadır. Sivil pazarlar için hafif, düşük profilli kişisel malzeme çeşitleriyle, Dyneema® liflerinden üretilmiş balistik ve bıçaklanma ile yaralanmayı önleyici malzemeler ile koruyucu yelek, kalkan olarak güçlendirilmiş çanta ve evrak çantaları örnek verilebilir. Bu ürünler için Şekil 3.26'de bazı örnekler verilmiştir. Dyneema® lif ile yapılan personel koruyucu zırh malzemeleri, askerlerin, kolluk kuvvetlerinin, ticari pilotların ve yüksek korunma gerektiren sivillerin korunmasını sağlamaktadır. Şekil 3.27'de bazı örnek kullanımları gösterilmiştir. Dyneema® teknolojisine sahip zırhlar; konforlu, hareketliliği ve verimliliği artıran daha hafif, esnek ve maksimum koruma sağlamaktadır (Werff ve Heisserer, 2016).



Şekil 3.26. Dyneema® Lif ve Kompozit Ürünlerinden Yapılmış Bazı Savunma Alanındaki Örnekler (www.dsm.com, 2019)



Şekil 3.27. Balistik korumalar için Dyneema® kompozitlerinin uygulamaları ile bazı balistik koruyucu malzemeler (Werff ve Heisserer, 2016).

UHMWPE lifleri sentetik lif çeşitleri içinde yer almaktadır. UHMWPE lifleri üstün mekanik özellikleri ve diğer üstün özellikleri bakımından bazı lif çeşitlerinden üstünlük göstermektedir. UHMWPE lifi ticari üretim hakları DSM firmasında Dyneema® adı ile lisanslı olmaktadır. UHMWPE lifi ya da kompozit ürünleri birçok alanda kullanıma sahiptir. UHMWPE'nin mekanik özellikleri (yoğunluk:0,97 gerilim:2,7-3,00 GPa, modül: 90-100 GPa), diğer yüksek yüksek performans liflerle karşılaştırıldığında üstün olduğu gözlenmiştir (Hearle,2001). UHMWPE polimeri kompozit yapılarda matris olarak da yaygın kullanıma sahiptir.

3.7. Bazı yüksek performans liflerin özelliklerinin değerlendirilmesi

Yüksek performans liflerin genel anlamda kullanım amaçları göz önüne alındığında; balistik amaçlı kullanımları için öncelik olarak yoğunluğu düşük, modülü yüksek, çekme dayanımı yüksek ve şekil değiştirme (% uzaması) düşük olması önemlidir. Önceki bölümlerde açıklanan liflere ek olarak, balistik amaçlı kullanılan seramik bazlı lifler Alimuna(Al_2O_3), Boron(bor karbür(B_4C)), silisyum karbür (SiC), E-Cam(E-Glass), S-Cam (S-Glass) ve Alimüna borosilicate (nextel 440) şeklindedir. Seçilmiş yüksek performans liflerin genel özelliklerinin karşılaştırması Tablo 3.26' verilmiştir.

Tablo 3.26. Bazı yüksek performanslı liflerin karşılaştırılması (Committee on Opportunities in Protection Materials Science and Technology for Future Army Applications, 2011).

Lif türü	Lif adı	Yoğunluk (g/cm3)	Modül (GPa)	Çekme mukavemeti (GPa)	Basma dayanımı (GPa)	Şekil değiştirme (%)
Polimerik lifleri	Nylon	1.14	4.3[a],1.2[b], 0.4[c]			25
	İpek	1.36	30-60	1.1-2.9		7-12
	Kevlar® 49	1.45	125[a],2.5[b] ,1.4[c]	3.5[a]	0.4[a], 0.06[b]	2.6-4.2
	Kevlar® 149	1.47	185[a],2.5[b] ,1.2[c]	3.4[a]	0.4[a], 0.07[b]	
	Spectra® 1000		89[a],1.2[b], 0.18[c]	2.4-3.4	0.2[a]	2.8-3.0
	Zylon® HM	1.56	270[a],1.0[c]	5.8[a]	0.3[a]	2.5
	M5® (PIPD)	1.70	270[a]	>4.0[a]		>1.4
	Vectran®	1.47	65[a]	2.9[a]		3.3
Karbon bazlı lifler	Zift Bazlı (P-100)	2.15	758[a],4.1[b] ,4.7[c]	2.41[a]	0.5[a], 0.13[b]	0.3
	Zift Bazlı K-1100	2.2	965[a]	3.10[a]		
	PAN Bazlı (T-300)	1.79	230[a],6.0[b] ,15.0[c]	3.75[a]	~3.0[a], 2.7[b]	
	PAN Bazlı (T-800)	1.8	300a	5.6[a]	~3.0[a]	
Seramik ve cam bazlı lifler	Alumina (Al2O3)	3.7	350[a], 12-26[b]	1.7[a]	6.9[a], 2.3[b]	
	Boron (B4C)	2.5	415[a]	3.5[a]	5.0[a]	
	SiC (Nicalon)	2.8	200[a]	2.8[a]	3.1[a]	
	SiC (CVD)	3.0	400[a]	3.4[a]		
	E glass	2.58	76[a], 68[b], 38[c]	3.4[a]	4.2[a] 2.7[b]	2
	S glass	2.46	90[a]	4.5[a]		
	Alumina borosilikat (Nextel 440)	3.05	186[a]	2.1[a]		
Metal lif	**Çelik**	7.8	200[a]	2.8[a]		1.4

Not: HM, yüksek modüllü; PIPD, poli [2,6-diimidazo (4,5-b-4p, 5p-e) piridinilen 1,4 (2,5-dihidroksi) fenilen]; PAN, poliakrilonitril; CVD, kimyasal buhar birikimi.
[a] =boyuna [b] =enine [c]=kesme(kesim)

Tezin bu bölümünde verilen bilgiler sonucunda yapılan değerlendirmeler burada verilmiştir. Balistik amaçlı kullanılmakta olan tekstil materyallerinden başlıca gelenleri balistik liflerdir. Tekstildeki kullanılan bu balistik amaçlı lifler ya lif olarak ya lif dokunması ile elde edilmiş olan dokuma ya da örme kumaşlar yada balistik amaçlı zırh malzemelerin kompozit yapılarında takviye malzemesi olarak kullanımı sağlanmaktadır. Modern balistik koruma amaçlı yelek zırhların neslinin devrimi, 1960'ların sonlarında, balistik koruma özelliğine sahip sentetik lifli malzemelerin geliştirilmesi ile oluşmuştur.

Balistik liflerin başlıca özelliklerinden düşük özgül ağırlığı ve mekanik özellikleri yüksek olan lifler tercih edilmektedir. Balistik lifler teknik tekstiller konusunda incelendiklerinde yapay lifler ön sıralarda yer almıştır. Yapay liflerin yanında sınırlı sayıda kullanımda olan mineral (seramik, cam ve metal) esaslı liflerde yer almaktadır.

Balistik amaçlı liflerin kullanımı günümüzde yeni gelişmeler sağlamıştır. Yapay liflerin ya da hand made (insan yapımı) lifler genellikle düşük özgül ağırlıkları ve yüksek mekanik mukavemet özellikleri ile balistik amaçlı korumalarda zırh malzemelerinde kullanımlarını ön plana çıkarmıştır. Balistik amaçlı koruma için kullanım ihtiyacı sağlayan liflerin bazıları şöyledir; karbon lifleri, aramid lifleri, PBI (Polibenzimidazole) lifleri, PBO (polifenilenbenzobisaksazol) lifleri, PIPD (poli piridpbisimidazol) Lifleri ve UHMWPE (Ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen) lifleri genel olarak balistik koruma amaçlı kullanılan teknik liflerdendir. Balistik amaçlı koruyuculuğu incelendiklerin de bu liflerden özellikle aramid ve UHMWPE (Ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen)' nin kullanımları günümüzde devam etmektedir. Tablo 3.27 Geçmişten günümüze kadar gelen yüksek dayanıma sahip ve yoğunlukları düşük teknik tekstil hammaddesi olarak kullanım sağlanan lifler verilmiştir ve bu lifler aynı zamanda özellikleri bakımından balistik koruma amaçlı kullanılmaktadır.

Tablo 3.27 Geçmişten günümüze kadar gelen yüksek dayanıma sahip ve yoğunlukları düşük teknik tekstilhammaddeleri.

Fiber	**Yoğunluk(g/cm^3)**	**Kopma dayanımı (GPa)**	**Modül (GPa)**
Karbon	1,78-2,00	2,7-3,4	230-390
Aramid	1,45-1,47	2,8	60-120
PBO(Poli-pfenilenbenzobisoksazol) Lifleri	1,5	5,6-5,8	180-280
PBI (Poli-benzimidazol) Lifleri	1,3-1,43	0,4	5,9
PIPD(Poli-piridobisimidazol) Lifleri	1,7	3,5-6	330-360
UHMWPE	0,97	1,7-4,0	90-150

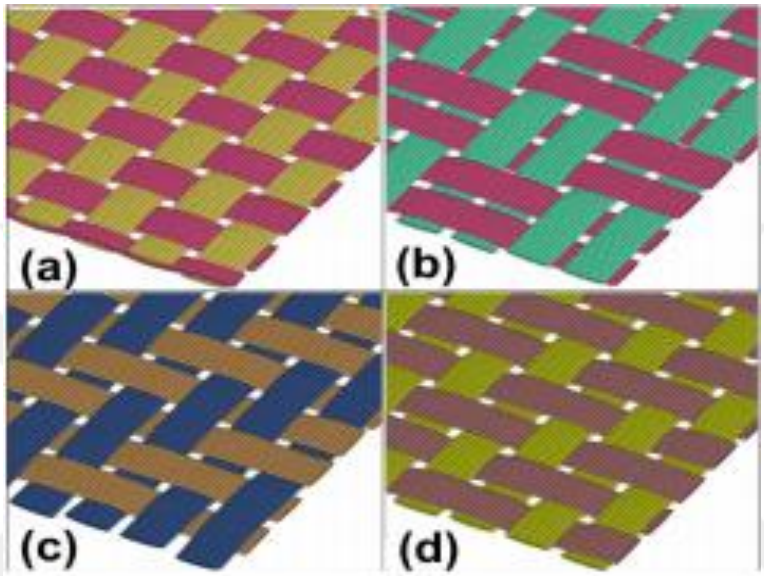
Balistik koruma amaçlı lifler incelendiklerinde elde edilen veriler doğrultusunda yoğunluklarının oldukça düşük ve dayanımlarının oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Burada ise kullanılan malzemenin hem düşük yoğunluğu sayesinde hafiflik hem de yüksek mekanik dayanımları ile üstün koruma özellikleri sağlandığı bilinmektedir. Günümüzdeki lif üretim yöntemleri ve yapay liflerin gelişimleri balistik koruma için yeni liflerin üretimine gelecek vadeden bir bilim olarak tekstilin önemini göstermektedir.

4. BALİSTİK AMAÇLI KULLANILAN KUMAŞ YAPILARI

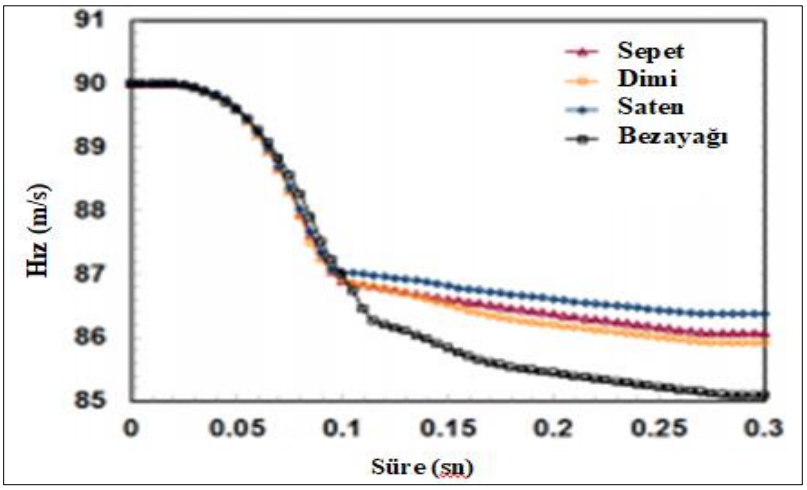
Balistik amaçlı kullanılan kumaş yapıları dokuma, örme ve dokusuz yüzeyler olup, balistik amaçlı kullanılan liflerden üretilmiştir. Balistikte standartlar doğrultusunda istenilen koruma seviyelerini sağlayabilmek için lif formu yerine kumaş formu tercih edilmektedir. Balistik amaçlı zırh yelekleri incelendiğinde kumaşların çok katlı olarak kullanıldığı görülmektedir.

Balistik amaçlı üretilmiş kumaşın mermi ile teması halinde merminin enerjisini en iyi şekilde (enerjinin tamamı ya da tamamına yakınını) absorbe etmesi istenmektedir. Bu bölümde birçok dokuma ya da dokusuz yüzey olarak üretilmiş balistik kumaş yapıları incelenmiştir. Yapılan incelemenin, herhangi bir dokuma noktasının bir enerji konsantrasyonu yarattığını, böylece temeli oluşturan malzemenin zayıfladığı görülmektedir. Lif uzunluğu ne kadar uzun olursa balistik koruma amaçlı direnç daha iyidir sonucuna varılmıştır. Bu nedenle darbe enerjisi dağıtımı için en iyi koşullar dokuma noktaları olmayan lifli malzemelerde bulunur. Birçok faktör kumaşların balistik etkiye tepkisini etkiler. Bu faktörler, lifin malzeme özellikleri, lifin dokuma gerginliği, dokuma mimarisini, uzak alan sınır koşullarını, aralıklar arası sürtünmeyi, mermi ile iplik arasındaki sürtünmeyi, mermi geometrisini ve hızını içermektedir. (Committee on Opportunities in Protection Materials Science and Technology for Future Army Applications,2011). Balistik koruma amaçlı kumaşlar, son yıllarda kurşungeçirmez malzemenin sertliğini, direncini ve ağırlığını geliştirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sorunu çözmek için, 1990 yılından bu yana Uni Direction (tek yön) yapı malzemesi (örneğin, Honeywell Co. Ürünü) geliştirilmiştir ve pazara sunulmuştur (Chua ve Chena, 2010). Benzer hacim yapısına sahip ancak farklı dokuma konstrüksiyonuna sahip 4 farklı dokuma modeli (bezayagı, dimi, sepet ve saten örgü) incelenmiş ve Şekil 4.1'de gösterildiği gibi dört kumaş yapısı, çarpma anında kaymadan kaynaklı dağılan sürtünme enerjisini etkileyenin, çözgü ve atkıların ipliklerinin birbirleri arasından geçiş farklılığından kaynaklı olan iplikler arasındaki

toplam temas yüzeylerinin farklı olmasını göstermiştir. Şekil 4.2' de gösterildiği üzere bu 4 kumaş mimarisi arasından mermi enerjisini absorbe eden en iyi sonucu bezayağı dokuma mimarisi sağladığını bildirilmiştir (Yang ve ark., 2014).



Şekil 4.1 Dört dokuma mimarinin sonlu eleman modellemesi (Yang ve ark., 2014)



Şekil 4.2. Benzer örgü yoğunluğuna sahip dört farklı kumaş mimarisine göre mermi hızlarının sayısal sonuçlarının karşılaştırılması (Yang ve ark., 2014)

Burada balistik amaçlı üretilmiş kumaşların dokuma yapıları ve dokusuz olarak üretilmiş kumaş yapılarının balistik olarak katkılarının avantajları ve dezavantajları ile ilgili çalışmaların inceleme sonuçları verilmiştir.

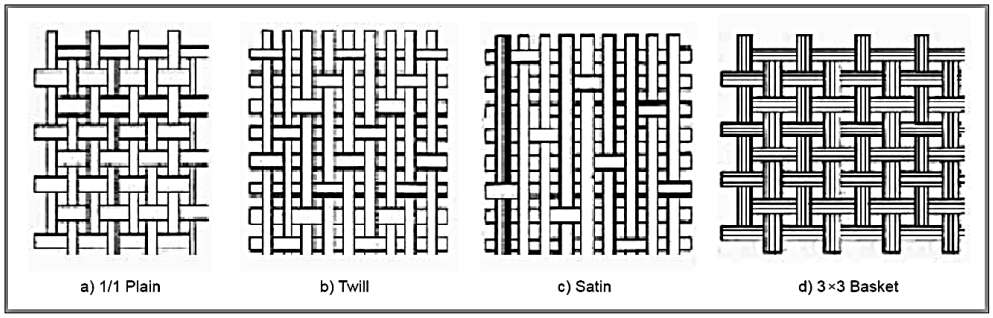
4.1.Kumaş Konstrüksiyonu

Kumaş yapıları özellikle mekanik özellikleri olmak üzere, balistikte önemlidir. En yüksek mukavemete ve genel anlamda diğer yapılardan daha üstün özellikler gösteren kumaşlar balistik amaçlı olarak seçilmektedir. Bu kumaşların seçiminde ana etken olarak üstün mekanik özelliğinin yanında dokuma konstrüksiyonun, hafiflik ve yüksek kırılma (kopma, yırtılma gibi) dayanımı özellikleri gibi parametreler incelenir.

Kumaş yapıları ile ilgili yapılmış çalışmalar:

Balistik amaçlı kumaşlarda farklı konstrüksiyonlar kullanılabilir. Bezayağı: En kısa dokunmuş lif uzunluğuna ve kolay katlanabilen özelliklere sahip sert kumaşlar üretmenin en yaygın dokuma yöntemidir Dimi : Dokunmuş kumaşın, aynı birim alanı için düz örgüden daha az çözgü-atkı dokumaları vardır. Lif, farklı geçiş ipliklerinin tasarımına izin verecek kadar uzundur. Saten: Her bir birim alanda en uzun dokuma lif veya iplik uzunluğu ve yüksek yumuşaklık ile en az çözgü ve atkı aralıklarla iç içe geçişe sahiptir. Basket (Sepet): Birkaç çözgü ipliği birkaç atkı ipliği ile yan yana çapraz olarak geçen bir düz örgü çeşididir.

Chua ve Chena (2010) çalışmalarında; bir Suzuki dokuma tezgâhı ile, Kevlar®29 lifinden aynı yoğunlukta ancak farklı kumaş yapısına sahip kumaşlar üretmişlerdir. Dört farklı kumaş konstrüksiyonu; bez ayağı, dimi, saten ve 3/3 sepet örgü kullanmışlardır. Sepet dokuma kumaşlar daha esnek ve daha sağlamdır ancak bezayağı dokumadan daha az dayanıklıdır. Sepet örgüsü genellikle kompozit endüstrisinde kullanılır. Çalışmada yer alan başlıca dokuma yapısı çeşitleri Şekil 4.3’ de verilmiştir



Şekil 4.3. Çalışmada kullanılan a) 1/1 bezayağı, b) dimi, c) saten, d) 3*3 sepet örgü yapılarının desenleri (Chua ve Chena 2010).

Kumaşlar ile ilgili olarak; dokuma yapısı, dokuma yoğunluğu, dayanıklılık, nihai uzama, yüzey sertliği ve sıkma haslığına bağlılık durumları bulunmaktadır. Bu araştırma, kullanılan hammadde ve yoğunluk açısından eşit özellikteki para-aramid kumaşların testine ayrılmıştır. Bununla birlikte, çeşitli dokuma kumaş yapılarının mermilerin oluşturdukları darbeye maruz kalıp darbeye karşı dirençlerinin davranışları üzerindeki etkilerini gözlemlemek ve incelemek için farklı dokuma konstrüksiyon yapısındaki kumaşlar test edilmiştir. Test edilen Kevlar® dan yapılmış olan kumaşların mukavemeti ve uzaması Tablo 4.l' de özetle ifade edilmiştir. Bu veriler, farklı dokuma konstrüksiyonlarındaki olan kumaşların mukavemeti ve esnekliğini ya da sertliği göstermektedir.
Test edilen kumaşlar arasında balistik amaçlı bezayağı, 3 × 3 sepet ve 1/3 dimi örgüler en yüksek mukavemet değerlerini sağlamıştır; Aynı zamanda bu malzemeler, gerilme uzaması ≥ %10 ile oldukça iyi bir esneklik göstermektedir. En zayıf malzeme 8H saten kumaş olmuştur. 1/3 ve 2/2 dimi dokuma malzemelerini karşılaştırarak, mukavemetlerindeki düşük farka rağmen, sertliklerinde kayda değer farklılıklar gösterdiği görülmektedir. Ayrıca, 1/3 dimi oldukça esnek, 2/2 dimi ise oldukça sert bir yapıda kumaştır. Benzer bir durum 2 × 2 ve 3 × 3 Sepet dokuma malzemeleri için de gözlenmiştir: 3 × 3 sepet örgü daha esnektir.

Uygulanan testlerden elde edilen sonuçlarda kumaşların genel özellikleri ve mekanik dayanımları ile ilgili veriler Tablo 4.1 de verilmiş ve çeşitli mermi

türlerine karşı tek katlı kumaşların dayanım ile ilgili veriler Tablo 4.2'de kıyaslanmıştır. FSP 100m /s farklı hızlarındaki yapıdaki tek katmanlı kumaşları etkiledikten sonra girinti ve harcanan enerjiyi gösteren veriler ise Tablo 4.3 de ve FSP, farklı yapıdaki 7 katmanlı kumaşları çarptıktan sonra hız ve harcanan enerji olarak sınırlandırılması ise Tablo 4.4 de verilmiştir.

Tablo 4.1. Çeşitli kumaş yapılarının dayanımı ve esneklikleri (Chua ve Chena 2010).

No	Kumaş yapısı	Kalınlık, mm	Çekme uzaması, mm	Maksimum güç, (kN)	Maks. normalize edilmiş güç*, (kN)
1	1/1 bezayağı	0.47	17.6	9.5	20.2
2	8H saten	0.52	7.9	7.9	15.1
3	1/3 dimi	0.46	14.3	9.1	19.8
4	2/2 dimi	0.45	7.6	8.6	19.2
5	2*2 sepet	0.45	9.9	8.7	19.3
6	3*3 sepet	0.70	20.8	15.0	21.4

* - Maksimum mukavemetin değeri 1,0 mm kumaş kalınlığına normalleştirilir.

Tablo 4.2. Çeşitli kumaş konstrüksiyonları ve mermi tipleri için tek katmanlı limit hız. (Chua ve Chena 2010)

No	Kumaş yapısı	Kumaş kalınlığı, mm	AP çelik özlü 5.1g mermi		AK 47 M43 8g FMJ Mermi	
			Limit hız, m/s	Normalize limit hız*, m/s	Limit hız, m/s	Normalize limit hız, m/s
1	1/1 bezayağı	0.47	58	123	79	168
2	8H Saten	0.52	20	38	25	48
3	1/3 dimi	0.46	31	67	41	89
4	2/2 dimi	0.45	41	91	55	122
5	2*2 sepet	0.45	53	118	67	149
6	3*3 sepet	0.70	53	76	56	80

* - Sınır hızın değeri 1,0 mm kumaş kalınlığına normalleştirilir.

Tablo 4.3. FSP 100m/s farklı yapıdaki tek katmanlı kumaşları etkiledikten sonra girinti ve harcanan enerji. (Chua ve Chena 2010)

No	Kumaş yapısı	Numune kalınlığı, mm	Numune özgül ağırlığı, g/m^2	Penetrasyon derinliği, mm	Defarmasyon oranı X 10^4, mm	Limit hız Vr, m/s	Dağılmış enerji , J	Normalize edilmiş dağılan enerji*, J
1	1/1 bezayağı	0.47	268	6	1.67	61.2	138	513
2	8H saten	0.52	328	5	2.00	57.5	147	449
3	1/3 dimi	0.46	256	7	1.43	64.9	127	497
4	2/2 dimi	0.45	276	7	1.43	64.9	127	461
5	2*2 sepet	0.45	316	6	1.67	61.2	138	435
6	3*3 sepet	0.70	506	5	2.00	57.5	147	291

* - Dağıtılan enerjinin değeri, 1000 g'lık bir kumaş özgül ağırlığına göre normalleştirilir.

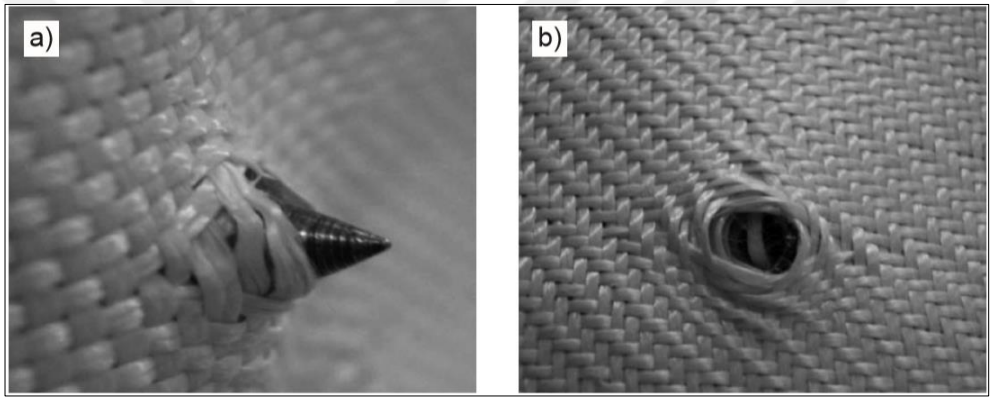
Tablo 4.4.FSP, farklı yapıdaki 7 katmanlı kumaşları çarptıktan sonra hız ve harcanan enerji miktarı (Chua ve Chena 2010)

No	Kumaş yapısı	Numune kalınlığı, mm	Numune özgül ağırlığı, g/m^2	Görünür yoğunluk, g/cm^3	Deformasyon derinliği, mm	Limit hız Vr, m/s	Dağılmış enerji, J	Normalize edilmiş dağılan enerji*, J
1	1/1 bezayağı	3.29	1,876	0,570	44	365	2028	1081
2	8H saten	3.64	2,296	0,631	44	289	935	407
3	1/3 dimi	3.22	1,792	0,557	44	310	1211	676
4	2/2 dimi	3.15	1,932	0,613	44	325	1421	735
5	2*2 sepet	3.15	2,212	0,702	44	389	2426	1097
6	3*3 sepet	4.90	3,542	0,723	44	400	2617	739

* - Dağıtılan enerjinin değeri, 1000 g'lık bir kumaş özgül ağırlığına göre normalleştirilir.

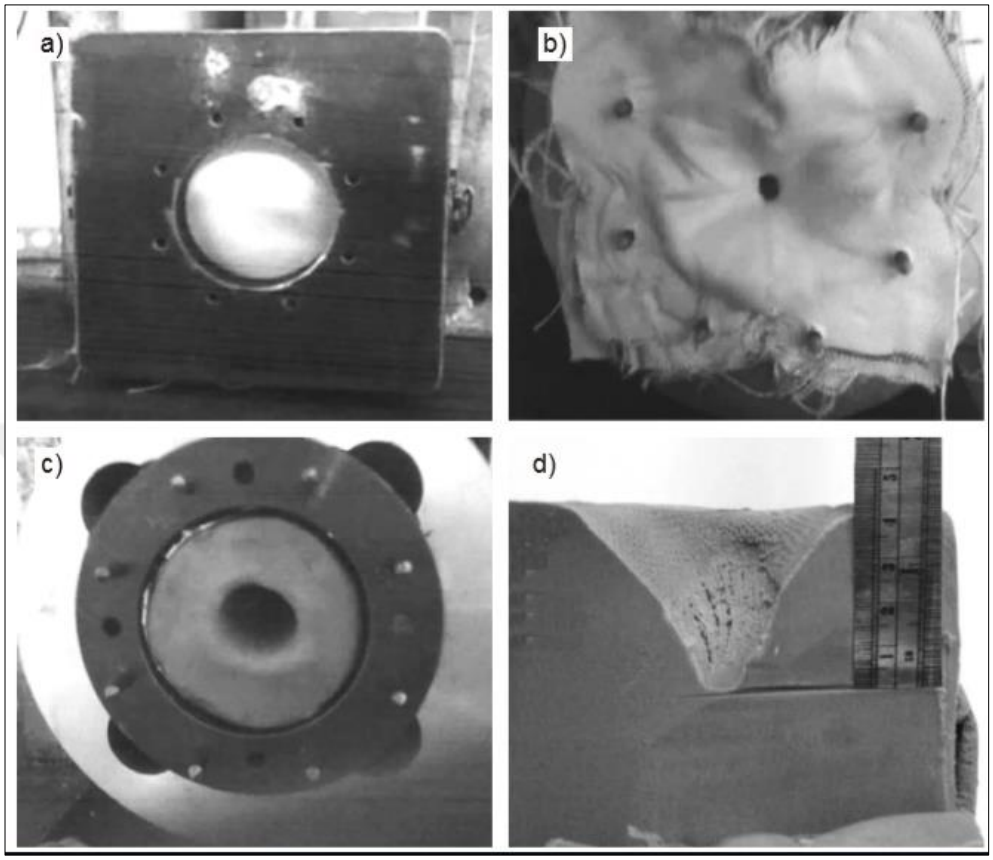
Normalizasyon analizi yapıldıktan sonra, Düz dokuma yapının en iyi balistik dirence sahip olduğu bulundu. Ancak her iki sepet dokuma yapısının beşinci (2 × 2) ve altıncı (3 × 3) örneklerinin birbirlerinden önemli ölçüde farklılık gösterdiğine dikkat etmek gereklidir. Kumaşlardaki hasarları sebebi dokuma modelleri farkıdır. Bir mermi bir kumaşı etkilediğinde lifler çeşitli şekillerde zarar görür: çekilmiş,

kırılmış (yırtılmış) veya her ikisinin bir kombinasyonu olmuş olabilmektedir. Ek olarak, merminin kumaşı delmesi, liflerin mermi yolundan itilmesinin nedeni, özellikle de Şekil 4.4 a ve b'de gösterilmiştir. Test edilen lif dokuma kumaşlar arasında, bezayağı dokuma açıkça mermilerin lifi itmesini ve kumaş içinden sıkışarak engellemesi gereken en kararlı kumaş yapısını sağlamaktadır. Bu durum incelendiğinde, bu bezayağı dokuma şeklinin diğer dokuma yapıları karşılaştırıldığında bu testlerde (Tablo 4.2) en iyi kurşun geçirmez özellikleri göstermesinin ana nedenidir.



Şekil 4.4.Çarpma sonrası sepet kumaşları (Chua ve Chena 2010)

Farklı tek katmanlı kumaş konstrüksiyonları sabit enerjide yüksek hızlı bir FSP etkisine maruz kaldığında, etkilenen kumaşın yüzeyinde açık bir kurşun izi bırakılmakta ve kumaşın arkasındaki plastilin kilinin yüzeyinde bir girinti açıkça görülmektedir. (Şekil 4.5. a, b, c ve d). Hem girinti hem de limit hız için tek katmanlı testin sonuçları Tablo 4.3' te verilmiştir.



Şekil 4.5. a) kumaş kelepçe, b) yüksek hızda etkilenen kumaş, c) yüksek hız etkisinden sonra kumaşın arkasında hamuru kil yüzeyine girinti, d) yüksek hız etkisinden sonra hamuru kil üzerinde görünen bir girinti kesiti (Chua ve Chena 2010).

FSP'nin enine kesiti U şeklindedir, bu nedenle, kumaşa zarar vermesi kolay değildir, bu da plastilin kili yüzeyinde daha küçük bir girinti ve her iki AP çeliğile karşılaştırıldığında kumaşların FSP'ye karşı daha iyi balistik direnç performansı gösterir. Bununla birlikte, harcanan enerjinin normalize edilmesinin karşılaştırılması (Tablo 4.3), en iyi sonuçların 1/1bezayağı dokuma (1. sıra) ve 1/3 Dimi dokuma (3. sıra) gösterdiği sonucuna varılmıştır. FSP kurşungeçirmez özelliklerinin daha kesin tahmin edilebilmesi ve problemlerin üstesinden gelmek için, etkinin yüksek enerjiyle yüksek hızda yapılması ve kumaşlar arasındaki farkın

V_{50} limit hız testi kullanılarak belirtilmesi gerekir. Tablo 4.4. de MIL-STD-662F testine göre farklı yapıdaki 7 katmanlı kumaşların çarpılmasıyla elde edilen 44 mm'lik bir girintinin FSP sınır hızını göstermektedir. Sepet 2×2 ve 3×3 malzemeleri, her ikisi de sepet örgü yapısında olmasına rağmen, FSP sınır hızına (Tablo 4.4.' te 5 ve 6 numaralı hatlar) göre kumaşlarda önemli ölçüde farklılık göstermiştir. Bununla birlikte, lamine edilmiş kumaş numuneleri test edildiğinde, 2x2 sepet dokuma kumaş, FSP'ye karşı en yüksek limit hıza sahiptir. Bunun sebebi olarak birim alanda daha fazla miktarda lif içermesi ve dolayısıyla mermi, malzemede çekme dayanımı altındaki lifler tarafından tamamen bloke edilmektedir (Şekil 4.5a). Normalize edilmiş dağılan enerji (merminin enerjisi), diğer kumaş konstrüksiyonları için sıkma kuvveti altında saten dokuma yapıdaki kumaşları delmiş olup, balistik direnç performansının azaltmıştır. Bununla birlikte, eğer mermiyi engellemek için lif uzunluğu yeterince büyükse, başka deyişle "lif ne kadar uzunsa, balistik direnç performansı o kadar iyi olacağı" avantajını sağlayacağı ortaya çıkmıştır. Aslında, saten dokuma yapısı, yetersiz yoğunlukta uzun liflere sahiptir. Balistik direnç kabiliyetlerini yitiren lifler kurşun tarafından çekilmektedir. Öte yandan, bezayağı ve dimi dokuma yapıları daha yüksek bir çözgü atkı ağzı iç içe geçme yoğunluğuna sahip olup, böylece merminin etkisine etkili bir şekilde direnç gösterebilirler ve liflerin balistik direnç kabiliyetini tam anlamıyla yerine getirdikleri bilinmektedir. Kumaşın laminasyon tekniği ile oluşturulan katmanlı halinin, kumaş yapısını güçlendirerek kumaşın balistik direnç performansına da katkıda bulunduğu gösterilmiştir. Chua ve Chena 2010 da yapmış oldukları bu çalışmada elde edilen deneysel verileri inceleyerek, farklı dokuma yapıların farklı koşullar altında çeşitli şekillerde davrandığını gözlemlemiş ve raporlamışlardır. Bununla birlikte, bu verileri karşılaştırarak, aşağıdaki ana sonuçlar çıkarılmıştır: Test edilen Kevlar® dokuma kumaş numuneleri arasında 1/1 bezayağı dokuma konstrüksiyon, zırh delici ve tüfek mermilerine karşı, özellikle düşük hızlarda (düşük enerji) en iyi özelliklerini sağlamıştır. Çok katmanlı yapıların yüksek hızlı FSP mermi testinde, 2 × 2 sepet dokuma kumaşı ve ardından

1/1 bezayağı dokuma yapıya sahip kumaş daha yüksek bir balistik direnç performansına sahiptir ve her iki dokuma yapısının balistik nitelikleri, diğer lif dokuma kumaşlarından önemli ölçüde yüksektir. Saten dokuma kumaş tüm testlerde en zayıf kurşun geçirmez özellikleri sergilemiştir. Önceki çalışmalarda 1/1 bezayağı kumaşın en yüksek V_{50} değerini gösterdiği görülmüştür. Araştırmaları, sepet (2 × 2) kumaşların düşük hız etkisi altında en yüksek enerji emme kapasitesine sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Çalışmanın sonucunda 1/1 bezayağı kumaş yapısı ve 2 x 2 sepet örgü yapısının en iyi balistik sonuçları verdiği ortaya konmuştur.

Balistik testler için, kumaş numuneleri çözgü iplikleri üzerine iki ucundan sabitlenir sabitlenmiş kumaş numunesine mermi gönderilir ve yakalanır. Merminin çarpması ile stres dalgası darbe noktasından dışarı doğru yayıldıkça kinetik enerji kumaşa aktarılmaktadır. Enerji kısmen iplikteki lif deformasyonu ve kısmen de lifler arası kaymanın neden olduğu lifler arası sürtünme ile dağıtılmaktadır. Yeterince yüksek kütle ve hıza sahip bir mermi, kumaşa nüfuz edebilir ve kumaşın mermiyi engellemede başarısız olmasına neden olabilmektedir. Etki alanının incelenmesi, balistik etki altındaki liflerin bozulma mekanizmasının anlaşılmasına yardımcı olabileceği düşünülmüştür (Committee on Opportunities in Protection Materials Science and Technology for Future Army Applications, 2011).

Malzemenin balistik etkiye tepkisinin dinamiklerini anlamak için Wilde ve ark. (1973) yüksek hızlı fotoğrafçılıkla tek bir naylon kumaş tabakasını incelediler ve enerjinin büyük bir kısmının dik ipliklerin kırılmasıyla emildiğini buldular. Starratt ve ark. (2000), merminin sürekli hareketini izlemek ve böylece darbe kuvvetini ve enerji kaybını belirlemek için gelişmiş basit ve uygun maliyetli bir lazer hız sistemi kullandılar.

Kumaşların balistik özellikleri ile ilgili çalışmalarda ise, Shockey ve ark. (1999) ipliklerin mermiye tepkisi, merminin artık hızı, kumaşın merminin çarpmasına karşı tepkisi, enerji emilimi ve gerilme özellikleri incelenmiştir. Araştırmacılar, yüksek hızlı bir kamera ile farklı bakış açıları ve çözünürlük

altında, merminin başlangıç ve artık hızı ölçülmüş aynı zamanda merminin yönü hakkında veri toplamışlardır. Alüminyum levha yüzeyi ile Kevlar®, Spectra® ve Zylon® kumaşlarının özgül enerji soğurmaları karşılaştırıldığında organik bazlı kumaşların Aliminyum levhadan daha üstün oldukları bulunmuştur. Dokuma kumaşlar için sonlu elemanlar modeli kullanılmıştır. Modelin girdileri, ipliklerin geometrisi (gerçek ipliklerin yüksek çözünürlüklü görüntülerinden alınmıştır), dokuma kumaşların görünümü ve laboratuvar testlerinden alınan lif, iplik ve kumaş özelliklerini içermektedir. Çalışma sonucunda absorbe olan kinetik enerjinin kumaşın alanı ile doğrusal olarak arttığı görülmektedir. Merminin etki ettiği en son kumaş katının dikkate değer enerjiyi absorbe ettiği bulunmuştur.

4.2.Kumaşlarda Hata Mekanizmaları

Bir mermi tek lif veya ipliğe çarptığında, uzunlamasına ve enine dalgalar çarpma noktasından yayılır (Cheeseman ve Bogetti,2003; Cunniff 1992). Kinetik enerjinin çoğu mermiden ana ipliklere (mermiyle doğrudan temas eden) aktarır; ana iplikler ile kesişen dik iplikler daha az enerji emer. Grujicic ve ark. (2010), kumaş içindeki geçici deformasyon mekanizması ile ilgili yaptıkları çalışmada bu enerjinin; enine sapma, liflerin kopma gerilimine ulaşana dek ve sürekli olarak bozuluma uğrayıncaya kadar sürekli artığını belirlemişlerdir. Araştırmacılar, aşağıda verilen hata mekanizmalarının bütününü incelemişlerdir.

- Lif bağlarının ve ipliklerin kırılması
- İplik çekme
- Uzak iplik hataları
- Kama geçişi doğrultusu (merminin çapından daha küçük delik)
- Fibrilasyon
- Mermi ile kumaş, iplik ve lifler arasındaki sürtünmenin etkileri,

başlıca hata mekanizmalarıdır. Araştırmacılar, kumaşların performansını arttırmak için kaplama malzemelerinin kumaş yapısına eklenmesi gibi bazı mekanizmaların etkili olduğunun başka çalışmalarda görüldüğünü belirtmişlerdir (Grujicic ve ark. 2010).

4.3. Kumaşların Balistik Performansı için Önemli Konular

Kumaşların balistik performansı, kumaşların yapısı (lif, iplik, doku, vb), mermi, sürtünme, sıcaklık ve nem gibi birçok faktöre bağlıdır. Bu kısımda ana faktörler ve ilgili çalışmalar incelenmiştir.

4.3.1. Lif Özellikleri

Liflerin gerilme mukavemeti, modülü ve % uzama özelliği, liflerin balistik performansı için önemli olsa da, tek lifin bu özellikleri balistik performansı belirlemede yetersiz kalmaktadır. Örneğin Kevlar® lifi naylondan daha yumuşaktır ancak balistik performansı daha iyidir ve benzer şekilde dayanımı yüksek mukavemetli naylondan yaklaşık % 50 daha fazladır (Committee on Opportunities in Protection Materials Science and Technology for Future Army Applications, 2011).

Cunniff (1999 (a)), tek lifli mekanik özelliklere dayalı göreceli balistik kumaş performansı için, liflerin balistik performansını değerlendirerek bir U* parametresi geliştirmiştir (Eşitlik 4.1). U*, elyafa özgü tokluk ve gerinim dalgası hızının ürünüdür.

$$\boldsymbol{U^*} = \frac{\sigma\varepsilon}{2\rho}\sqrt{\frac{E}{\rho}} \tag{4.1}$$

Burada; *E* Lif modülü (liflerin doğrusal olarak elastik olduğu varsayılır), σ lif eksenel çekme dayanımı, Ɛ Fiber nihai çekme gerilimi ve ρ lifin özgül hacmi.

U*, liflerin V_{50} limit hızı sınırlarını tahmin etmek için kullanılabilirliği belirtilmiştir. Bazı yüksek performanslı liflerin (örneğin, UHMWPE) mekanik özellikleri gerilim hızına bağlıdır bunlarda kullanılabilirken, diğer kumaşlarda (ör. Karbon ve PPTA lifleri) gerilim hızı çok daha azdır, bu U * parametresinin ifadesinde hesaba katılmaz. 10^3 s^{-1}' den büyük gerinim hızlarında lif gerilme özelliğini ölçmeyi sağlayabilen test yöntemlerine ihtiyaç vardır. Yüksek oranlardaki basınç ve sıcaklığın, malzeme davranışı üzerindeki etkileri de dikkate alınmalıdır, polimerlerin mekanik davranışı basınca duyarlı olduğundan, UHMWPE nispeten düşük bir erime sıcaklığı noktasına (140 °C) sahiptir. (Committee on Opportunities in Protection Materials Science and Technology for Future Army Applications, 2011).

4.3.2.Kumaş Mimarisi

Konvansiyonel kumaş üretiminde atkı ve çözgü yönünde iplikler kullanılır. Bu iplikleri oluşturmak için liflere büküm verilir. Rao ve Farris (2000), bükümün mukavemet ve modül üzerindeki etkisini araştırmışlardır ve tüm lif ipliklerinin yaklaşık 7°'lik optimum büküm açısında en iyi gerilme mukavemetini gösterdiğini bulmuşlardır. Balistik uygulamalarda en yaygın örgü desenleri bezayağı ve sepet dokumadır. Cunniff (1992), seyrek dokuma kumaşın veya dengesiz örgünün zayıf balistik performansa yol açtığını ortaya koymuştur. Shockey ve ark. (2001), tek katlı Zylon® kumaşları üzerinde çalışmış ve absorbe edilen enerjinin kumaş alan yoğunluğu (m^2 ağırlık) ile orantılı olduğunu ancak balistik etkinliğe etkisinin zayıf olduğunu belirtmişlerdir. Chitrangad (1993), kumaşların örtme faktörünün (ipliklerin kapladığı alanın kumaşın tüm alanına oranı) balistik uygulamalar için önemli olduğunu ve 0.60 ila 0.95 aralığındaki örtme faktörü değerlerinin balistik performansa etkili olduğunu göstermiştir. Bu değerlerden daha düşük örtme faktörüne sahip kumaşlar çok gevşek yapıda olur. Bu değerlerden daha yüksek örtme faktörü değerlerinde ise dokuma sırasında bozulma meydana gelir. Atkı ipliklerinde daha yüksek kopma uzaması ve çözgü ipliklerinde daha az kopma

uzamasına sahip kompozit kumaşların V_{50} limit hızı, bükümsüz iplikten mamül kumaşlardan daha büyüktür.

Tan ve ark. (2005), Modelling crimp in woven fabrics subjected to ballistic impact çalışmalarında, modellemede iplik kıvrımını dikkate alarak daha doğru sonuçlar elde etmişlerdir. Kumaş kat sayısının da balistik performansını etkileyeceğini bildirmişlerdir (genel kullanım olarak 20-50 kat aralığında olabileceğini unutulmamalıdır). Dokuma kumaş zırhlar, viskoelastik özellikleri tek boyutlu elemanlardan oluşan bir ağ olarak modellenmiştir. İplik kıvrımı (dokumadan dolayı ipliklerdeki dalgalanmalar), ya iplik elemanlarını kumaşın yapısını tam olarak yansıtacak şekilde zikzak bir şekilde düzenleyerek ya da iplik elemanlarını düz bırakarak planlanmış. Ancak bundan kaynaklanan bazı eleman gerilimlerini azaltarak modele dahil edilebileceğini göstermişlerdir. Simülasyon sonuçlarının gerçek balistik testlerle karşılaştırılmasında, zikzak iplik elemanlarına sahip modelin gerçek testlerle daha yakın uyumlu sonuçlar verdiği, iki kıvrımı dahil etme yöntemi arasındaki farkın, enerji soğurma özelliklerini ve kumaş deformasyonunu tahmin etme açısından sıra dışı olduğunu göstermişlerdir. Zikzak iplik elemanlarına sahip model, deneysel sonuçlarla düz iplik elemanlı modele göre biraz daha yakın niceliksel uyum sağalacağını belirtmişlerdir. Temel fark, ilk modelin gözlenen deformasyonu tüm darbe işlemi boyunca delinme noktasına kadar tahmin edilen düzeyde ilerlerken, ikinci modele göre tahmin edilen kumaş deformasyonu, etki ilerledikçe gerçek test sonuçlarından sapmaya başladığını tespit etmişlerdir. Bu aynı zamanda, düz iplik elemanlarına sahip model tarafından emilen enerjinin düşük etkili hızlarda biraz daha düşük farkla tahmin edilmesi ile sonucuna ulaşmışlardır. Her iki model de yüksek darbe hızlarında kumaş tarafından emilen enerjinin iyi tahmin sonuçları vermiş ve düşük-yüksek hızlı etkiler için benzer gerilme ve kinetik enerji değerlerini göstermiştir. İki model arasındaki en büyük fark, teğet iplikler aralarındaki normal kuvvete oranlarının farklarıdır. Düz elemanlı model, zikzak elemanlı modele kıyasla iplikler arası kayma için daha büyük bir eğilim gösterdiğini bulmuşlardır.

Balistik performans üzerinde interply mesafesi etkiside araştırılmıştır (Cunniff, 1992; Lim ve ark., 2002). Mermi geometrisinin etkisi, artan kat sayısı ile daha az önem kazanmaktadır (Montgomery ve ark., 1982:Committee on Opportunities in Protection Materials Science and Technology for Future Army Applications 2011' den; Prosser ve ark. 2000). Üç boyutlu dokuma bir yapı, geleneksel iki boyutlu dokuma kumaşlara göre daha fazla kalınlık yönünde yönlendirme sağlamak üzere tasarlanmış bir kumaş kompozitinde incelenmiştir. Bu üç boyutlu yapı daha yüksek balistik performans gösterdiği ve çarpma etkisi altında daha az nüfuz eden kat yüzeylerine yol açtığını bildirilmiştir (Grogan ve ark.,2007).

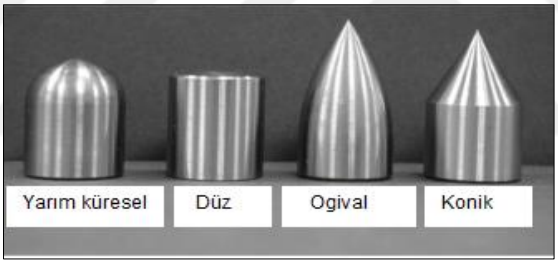
Kumaş mimarisini incelendiğinde ise 3 boyutlu yapıların balistik amaçlı korumada kesintisiz dokuma şeklinden dolayı daha etkin koruma sağladığı görülmektedir. Diğer bir yandan ise dokuma şekilleri incelendiğinde bezayağı yapıların diğer yapılara göre V_{50} limit hızı testinde daha etkin koruma sağladığı ancak kullanılan malzeme özelliğine göre değişiklik gösterebileceği belirtilmiştir. Bezayagının yanı sıra bazı sepet örgülerde de etkin balistik koruma sağlandığı tespit edilmiştir.

4.3.3. Mermi Geometrisi ve Kumaş Hasarı

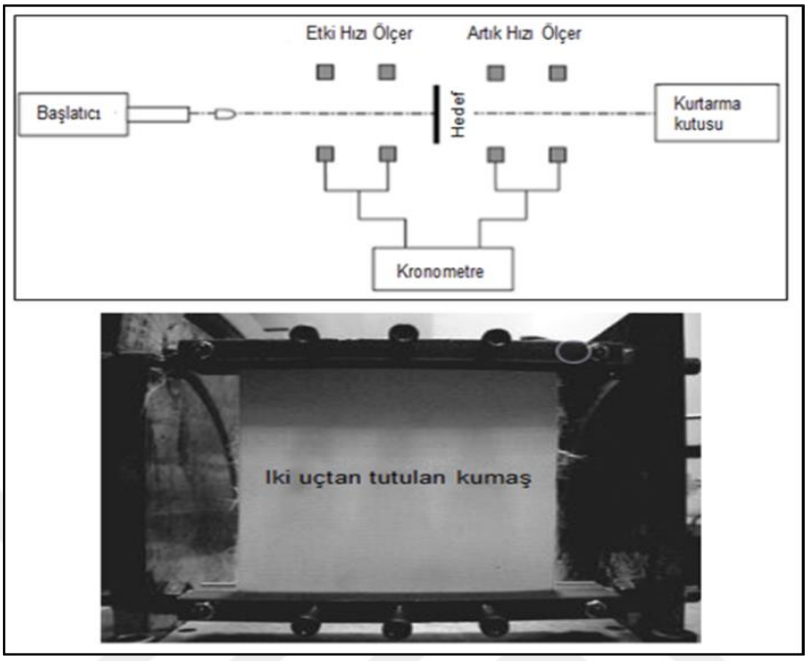
Bir merminin geometrisi, nüfuz etme kabiliyetini güçlü bir şekilde etkileyecektir. Keskin kenarlı veya sivri bir mermi, künt yüzlü bir mermiden daha kolay bir şekilde yüzeyde delinme sağlayacaktır. İplikleri kalınlık yönleri boyunca keser ve daha küçük bir spesifik enerji emilimine yol açmıştır (Lim 2002; Montgomery, 1982; Prosser, 2000).

Tan ve ark., (2003), Yüksek mukavemetli kumaşın farklı geometrili mermilerle delinmesi araştırmasında, tek katlı Twaron® kumaşlarının balistik performansı üzerindeki ogival, konik, yarım küre ve düz başlı dahil mermi şeklerinin (Şekil 4.6.) etkilerini araştırdılar. Deneyin kuramsal olarak düzenlenmesi Şekil 4.7' de gösterilmiştir. Mermi hızı 100-600 m/s aralığında balistik etkisini

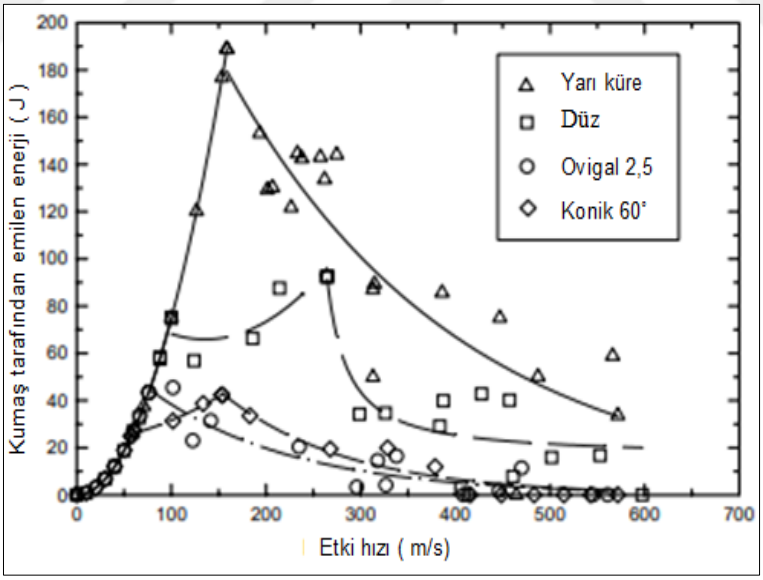
yarım küresel> düz başlı> ogival ≥ konik sıralaması olarak bulmuşlardır. Konik ve ogival mermiler en az iplik çekilmesine neden oldu, bu da kumaşlarda tutunamayacaklarını gösterimiştir. Yüksek hızlı mermiler, daha yüksek darbe hızlarında ve yüksek hızda mermi sapmalarında darbe noktasına doğru çekilen kumaş malzemesi çekmektedir. Sonuç olarak, bu dönüşümde kinetik enerji şeklinde dağıtılan darbe enerjisi miktarı artmaya devam etmektedir. Kumaş tarafından emilen enerjinin, balistik sınırın hemen üzerindeki darbe hızı ile artmaya devam ettiğini, çünkü kumaşın kinetik enerjisinin arttığını Şekil 4.8' da göstermiştir. Mermi şekillerinin kumaş üzerindeki çıkarken bıraktıkları etki ise Şekil 4.9' de verilmiştir. Düz kafalı merminin kumaş liflerini kesmesi Şekil 4.10'de gösterilmiştir. Dört farklı mermi çeşidi ile dört farklı hız sınırı testindeki Twaron® kumaştaki yırtılma ve kayma etkileri Şekil 11'da verilmiştir.



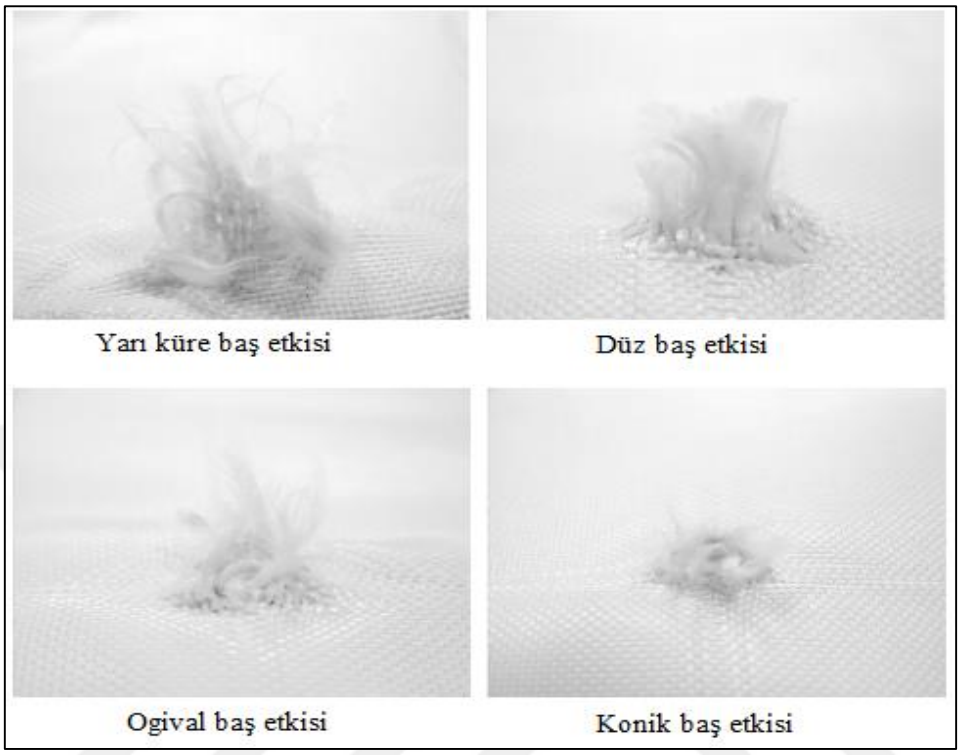
Şekil 4.6. Kullanılan mermi başlıklarının (çekirdeklerinin) şekilleri (Tan ve ark., 2003)



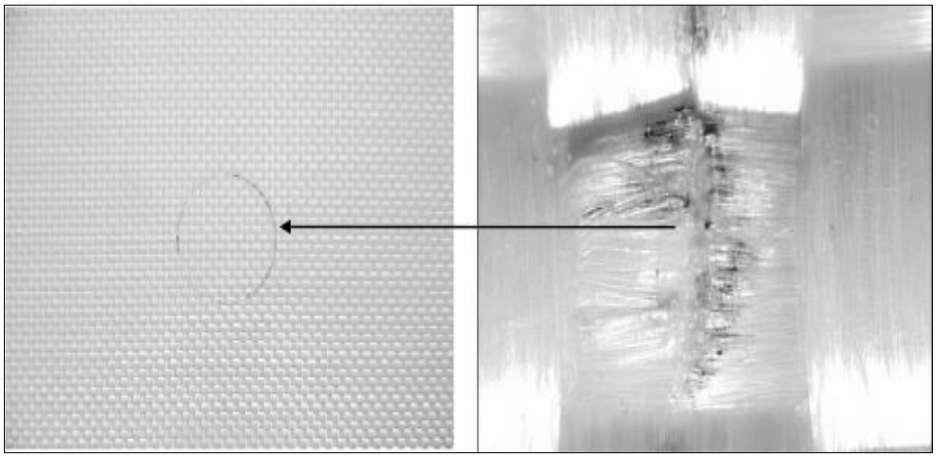
Şekil 4.7. Deneyin kuramsal olarak düzenlenmesi (Tan ve ark. 2003)



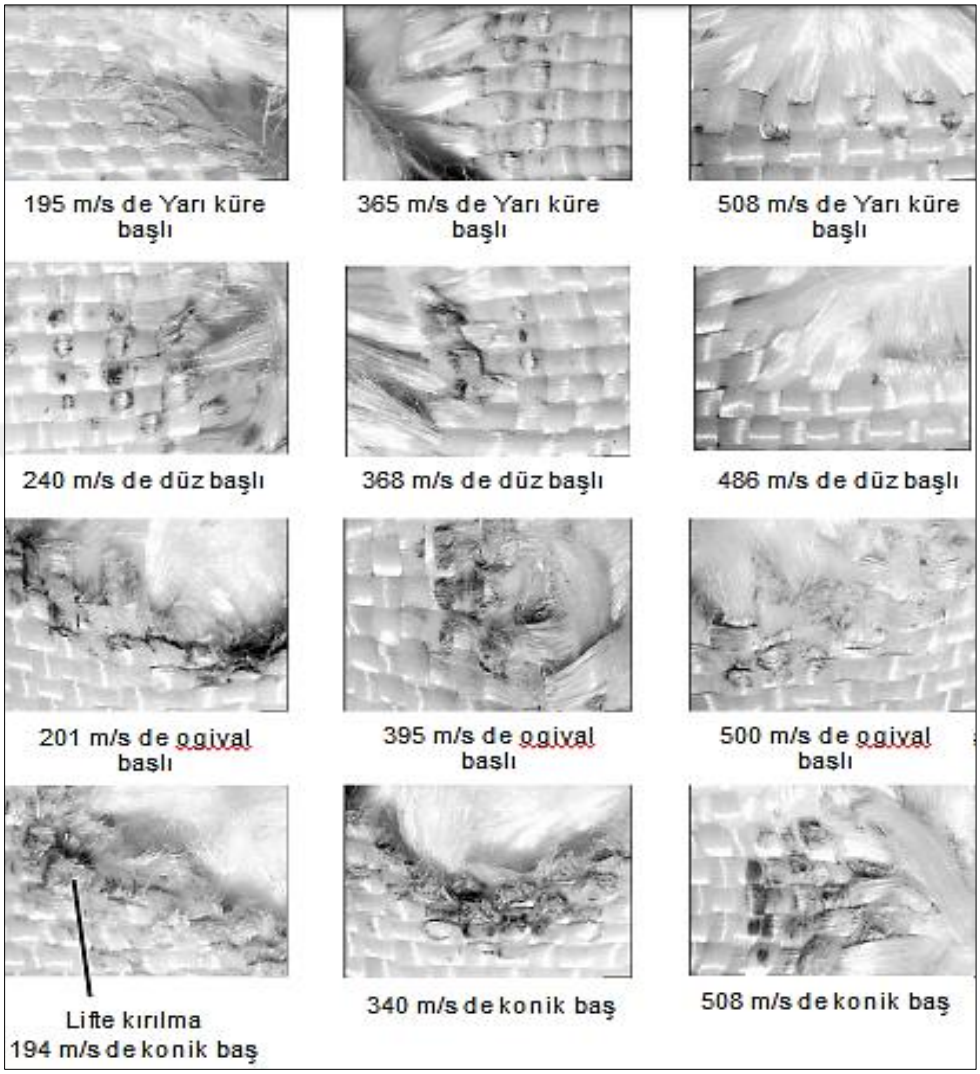
Şekil 4.8. Kumaş tarafından emilen enerji miktarı (Tan ve ark. 2003)



Şekil 4.9. Mermi şekillerinin kumaş üzerindeki çıkarken bırakılan etki (Yaklaşık 200 m / s'de) (Tan ve ark. 2003)



Şekil 4.10. Düz kafalı merminin kumaş liflerini kesmesi (Tan ve ark. 2003)



Şekil 4.11. Dört farklı mermi çeşidi ile dört farklı hız sınırı testindeki Twaron® kumaştaki yırtılma ve kayma etkileri (Tan ve ark. 2003)

Merminin hızı da kumaşların performansını etkilemiştir. Düşük hız darbesinde, enine dalganın yayılması için daha uzun bir süre vardır ve daha fazla kumaş alanı söz konusudur, bu da daha yüksek enerji emilimine yol açacaktır. Ayrıca, iplik çekilmesi ise ana başarısızlık etkeni olarak gözlenmiştir. Yüksek hız darbesinde, bazı lif türleri viskoelastik özelliklerinden dolayı daha sert ve daha

güçlü hal alır ve birincil bağ başarısızlığı ana başarısızlık mekanizması haline gelmiştir (Shim ve ark., 1995).

4.3.4. Kumaş Sınır Koşulları

Kumaşlar bir mermiden etkilendiğinde, hedefin boyutu ve kavrama koşulları önemlidir. Örneğin, daha uzun bir iplik, bozulmadan önce daha kısa olandan daha fazla deformasyon enerjisini yutabilmektedir. Böylece daha geniş bir alan daha yüksek enerji dağılımına yol açacaktır. Bununla birlikte, merminin hızı, liflerdeki şok dalgasının hızı ile karşılaştırıldığında çok yüksek hızlı olduğundan bu doğru bir yaklaşım olmamaktadır, çünkü o zaman hedefin sadece küçük bir kısmı merminin kinetik enerjisini dağıtabilir. Hedefin sınır koşulları da önemli bir rol oynamaktadır. Shockey ve ark. (1999) iki kenarlı bir kavisli kumaşın, dört kenarlı bir kumaştan daha fazla enerji emdiği ve serbest sınırları olan kumaşların ise enerjiyi en az absorbe ettiğini ortaya koymuşlardır. Chitrangad (1993), aramid kumaşlara ön gerilim uygulandığında balistik performanslarının arttığını ortaya koymuştur. Zeng ve ark. (2005) dört kenarlı kavisli kumaşlar için, iplikler kenara göre 45 ° açıyla konulursa emilen enerjinin arttığı gözlenmiştir.

Bir mermi ile bir kumaş arasındaki sürtünme, düşük hızda etkiliyken, yüksek hızda etkisi azalır (Tan ve ark., 2003). Briscoe ve Motamedi (1992), Kevlar® iplik sürtünmesi üzerine bir çalışma yapılmışlardır, İplik çekme kuvveti iplik içi sürtünmedeki artışla artar ve etkili iplik modülündeki artış interfilament sürtünmedeki artışa bağlanmıştır.

Yüksek sürtünmeli ve düşük modüllü kumaşlar, düşük sürtünmeli olanlardan daha fazla enerji yayabilmektedir. Duan ve ark. (2005) lifler arası sürtünmesinin enerji yayılımına etkisinin modellemesini yapmışlar ve etki sırasında küçük bir sürtünmenin enerji yayılımının etkili olduğunu bulunmuşlardır. Sürtünme, darbeye daha fazla ipliğin dahil edilmesine izin vererek etki bölgesindeki ana etkilenen kumaşların bütünlüğünü korumaya yardımcı olur, iplik gerginliğini ve kinetik enerjiyi artırarak enerji emilimini arttırır. Dischler (2001), Kevlar® (20 kat) kumaş

üzerinde sürtünme katsayısını 0.19'dan 0.27'ye çıkaran ince bir polimerik film uygulamış ve bir flechette (silahla vurulan küçük bir darta benzeyen bir tür mühimmat) durdurmada balistik performansta % 19 iyileşme rapor edilmiştir.

Tezin bu bölümünde verilen bilgiler sonucunda yapılan değerlendirmeler burada verilmiştir. Kumaşların darbe direncini genellikle dokuma mimarisi, iplik kıvrımı ve kumaşın enerji emme ve dağıtma mekanizmaları gibi çeşitli faktörler ile bağlantılı olduğu bulunmuştur. Kumaşlarda darbe direncini etkileyen ana faktörlerinden olan kumaş mimarisi, dokuma kumaşların mekanik performansını ve enerji emilimini önemli ölçüde etkileyen faktör olarak tanımlanmıştır. Farklı tekstil mimarileri olan kumaşlar üzerinde yapılan deneysel çalışmalar, geçirgenlik, gerilim dalgası hızı, gerilme mukavemeti, yırtılma mukavemeti ve darbe enerjisi emilimi gibi mekanik özelliklerinde büyük farklılıklar olduğunu ortaya koymuştur. Bunun dışında etkileyen faktörlerin tanımlanmasında, çoklu faktörlerin sıklıkla birleştirilmiş bir şekilde çalışıldığı ve izole edilemeyen iplikler arasındaki karmaşık etkileşim nedeniyle zor olduğu bilinmektedir. Bu, özellikle yapısal tepkilerin çoğunun sadece test sonrası aşamada ölçülebildiği tekstil malzemelerinden kumaşların balistik etkisi için geçerlidir. Farklı dokuma kumaşların enerji emme kapasitesi ve mekanik özellikleri, hasar mekanizmaları ve etkileyen faktörler arasındaki karşılaştırma henüz araştırılmamış bir alandır (Yang ve ark., 2014). Enerji emilimleri açısından karşılaştırma yapıldığında yüksek performans liflerinde aramid esaslı liflerden elde edilmiş yapıların ve kumaşların balistik V_{50} limit hız testlerine göre belli bir katta kumaşların, belli bir hızda mermiye koruma sağlayacağı ve mermi enerjisinin kumaşı parçalayarak yada lifler arasında hapis olarak engellenebileceği literatürde yapılan çalışmalar sonucunda elde edilmiş gözlemlerdir.

Tekstil malzemesi olarak kumaş yapılar dokuma, örme ve dokusuz yapıdadır. Balistik koruma amaçı ile üretilmiş liflerden elde edilmiş kumaş yapıları, dayanımı bakımından en yüksek muakavemete sahip kumaşlar olarak kullanılmaktadır. Balistikte standartlar doğrultusunda istenilen koruma seviyelerini

sağlaya bilmek amaçlı üretilen liflerin bir araya getirilerek kullanılması kumaş yapı şeklinde sağlanmıştır. Balistik amaçlı koruyucu zırh yelekleri ve koruyucu ekipmanların oluşumunda bulunan kumaşlar incelendiğinde çeşitli dokuma yapılardaki kumaşların birden fazla katlı yapı olarak kullanımı vardır. Balistik koruma amaçlı üretimi olan kumaş yapılarına bakıldığında kumaşın mermiye karşı koyabilmesi için merminin enerjisini en iyi şekilde (enerjinin tamamı ya da tamamına yakınını) liflerin absorbe etmesi istenmektedir. Birçok faktör kumaşların balistik etkiye karşı olarak tepkisini etkilemiştir. Bu faktörler, lifin malzeme özelliklerini, ipliği, dokuma mimarisini, uzak alan sınır koşullarını, aralıklar arası sürtünmeyi, mermi ile iplik arasındaki sürtünmeyi, mermi geometrisini ve mermi hızını içermektedir.

Balistik koruma amaçlı üretilen kumaşlar incelendiklerinde en verimli sonuçlar plain (bezayagı)> 3/3 sepet örgü> dimi olarak sıralanmıştır. En yüksek verimler 1/1 bezayagı ve 3/3 bezayagı yapılarda edilmiş sonra ise 3/3 sepet örgüler balistik korumada en yüksek verime sahip kumaşlar olarak belirlenmiştir. Bunun yanı sıra üretilen kumaş çeşitlerinde değişiklik göstermeleri mermi çeşitlerine üretilen lifin hammedesi ve kumaşın kendi içinde atkı atkı yada atkı çözgü yada örgü veya dokusuz ise bu kumaşların sürtünme dayanımlarına bağlı olarak değişiklikler göstereceği de gözlenmiştir. Tablo 4.4’ de çeşitli yapıdaki konfigürasyona sahip kevlar® kumaşın dayanım özellikleri verilmiştir bu tablo bizlere dokuma kumaş konfigürasyonlarının enerji dağılımı için ve merminin etkisinin azaltılmasında etkili olduğunu vermektedir.

Balistik kumaşlar konfigürasyonlarının yanı sıra kullanılacakları kat sayıları ile de bir araştırma konusu olmuşlardır. Bu durumda da kullanılan hammaddeye ve mekanik özelliklerine bağlı olarak birden daha fazla kat olarak kullanımları ön plana çıkmıştır. Bazı kumaşlar (UHMWPE ve PBO gibi) 9-10 kat gibi katlarda dayanım sağlarken bazı kumaşlar (kevlar®,naylon vb.) ise daha yüksek katlarda 25-40 kat olacak şekilde koruma sağlayabilmektedir. Bu

incelemeden de anlaşılacağı gibi kumaşın hammaddesi ve mekanik özellikleri çok büyük faktör olarak gözükmektedir.

Teknolojinin gelişmesi ile üretimi sağlanacak yeni hammaddeler ya da yeni lifler ve liflerden elde edilen kumaşlar çok büyük önem arz etmektedir. Bu veriler doğrultusunda tekstil mühendisliğinin bilim ve teknoloji ile gelişmesi doğrultusun da üretilecek ürünler balistik amaçlı korumalarda önem teşkil etmektedir. Söz konusu bu tekstil ürünleri gerek lif olarak gerekse kumaş olarak kullanımları son derece önemlidir. Çünkü elde edilen ürünler ne kadar hafif ve ne kadar yüksek mekanik dayanıma sahip ise o kadar yüksek koruma gerçekleştirmektedir. Yukarıda belirtilen niteliklere sahip kumaş esaslı koruma sistemlerinde yeni bir çağ başlamasına sebep olmuştur. Bu dönemde tek başına kumaş kullanımı değil kumaşların bir araya getirilmesi ya da farklı materyallerle birleştirilmesinden sonra kompozit malzemeler balistik koruma amaçlı zırh üretimde önem kazanmıştır.

5. TEKSTİL TAKVİYELİ BALİSTİK KOMPOZİTLER

Kompozit kapsamında ürünler daha çok özelliklerin güçlendirilmesi ve birbirinde eksik olan özelliklerini tamamlamak amaçlı bir araya gelen malzemelerden oluşmaktadır. Balistik amaçla kullanılan tekstil ürünlerinden lif ya da kumaş kullanımına ek olarak günümüz koşullarını karşılaya bilmek amaçlı balistik korumanın artırılması için kompozit malzeme üretiminde lifler ve kumaşlar takviye elemanı olarak kullanılmaktadır. Kompozitte Balistik koruma amaçlı tekstik malzemesi olarak genel anlamda lif, kumaş yada ikisi birden kullanılarak hem diğer malzemelere göre hafiflikten hemde yüksek mekaniksel dayanıma sahip tekstil takviyeli kompozit malzeme şeklinde kullanımı görülmektedir.

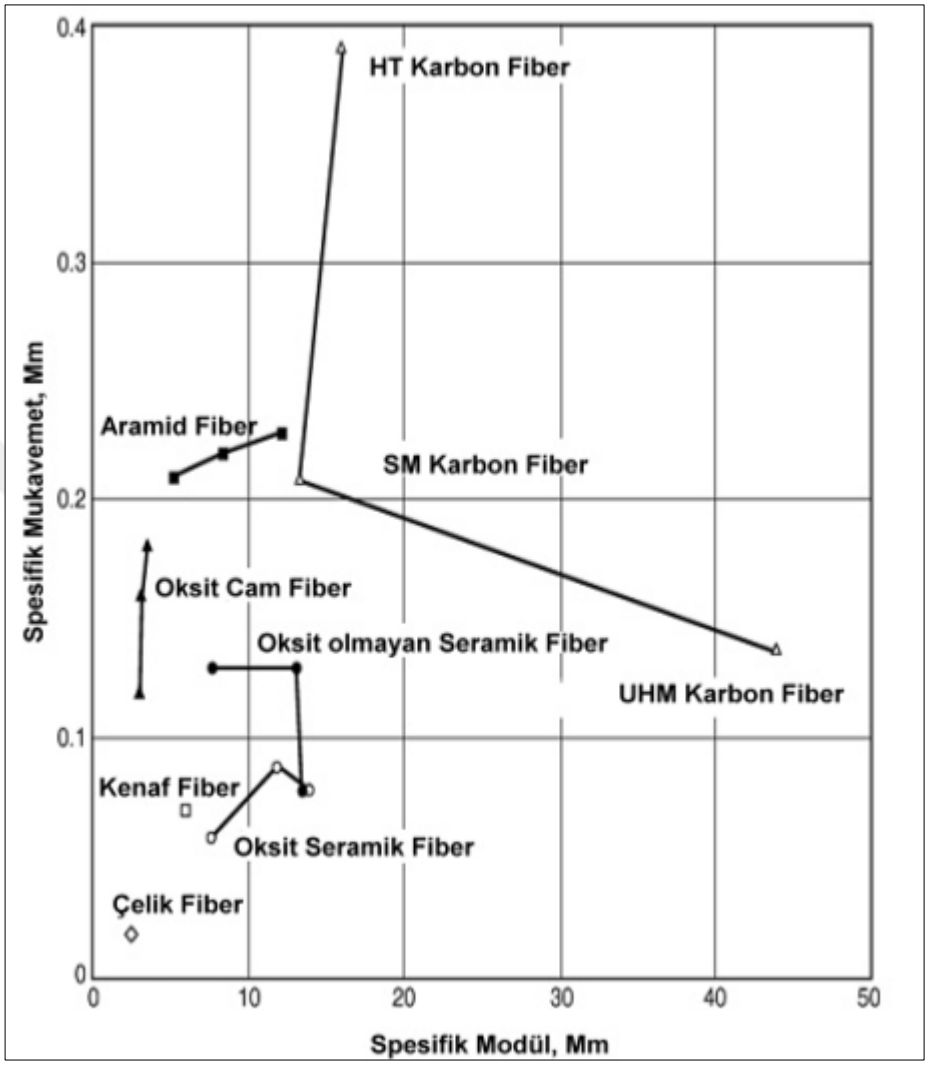
5.1. Kompozit

Modern teknolojide çoğu, geleneksel metal alaşımların, seramiklerin ve polimerik malzemelerin karşılayamadıkları alışılmadık özellikleri bulunduran konbinasyonlarına sahip malzemeler gerekmektedir. Bu konbinasyonlar kompozit malzemelerle elde edilebilmektedir. Kompozit iki veya daha fazla malzemenin birbirlerinin zayıf özelliklerini kapatıp güçlü özelliklerin kullanılmasıyla günümüzde önem arz eden konulardan olan büyük çoğunluğu teknolojik yetersizlikleri kapatmak amacıyla geliştirilmiş malzemelerdir. Kompozit malzemeler, teknolojinin gelişmesi ile geleneksel malzemeler olan seramik, metal ve polimerlerin özelliklerinin yetersiz kalması sonucu geliştirmiş ürünlerdir. Kompozit malzemeler matris ve takviye elemanları olarak 2 kısımdan oluşmaktadır. Matris malzemeleri, birleştirici ve bir arada tutma özelliklerine sahiptir. Yapıştırıcı özellikte olmaları ile birleştirilmek istenen malzemelerin bir araya tutulmasını sağlarken bir arada tuttuğu malzemelerin kimyasal ve mekanik özelliklerini bozmaması önem arzetmektedir. Bazı durumlarda matris malzemesinin de yapısal veya mekanik özelliklerinden yararlanılmaktadır. Matrisin kompozit bir yapıdaki görevi takviye elemanlarını (lifler, kumaşlar, seramikler vb.)

bir arada tutarken, etki eden yükün takviye elemanlarına iletimini sağlamaktır. Kompozitler matrise göre dört farklı kategoriye ayrılır (Callister, 2007).

Bir kompozit; günümüzdeki malzeme çeşitlerinden olan yani metaller, seramikler ve polimerlerden bir araya gelen iki (veya daha fazla) münferit materyalden oluşur. Farklı bileşimler ile metal, seramik ve polimerlerden oluşan kombinasyonlardan elde edilen çok fazla sayıda kompozit türü mevcuttur. Ayrıca, doğal olarak oluşan bazı malzemelerin de kompozit olduğu düşünülmektedir. Ahşap ve kemik bunlara birer örnektir. Bununla birlikte, kompozitlerin çoğu sentetik veya insan yapımı malzeme katkılı kompozitlerdir (Callister, 2007).

Takviye malzemesi olarak kullanılan lifler, matrisi oluşturan polimerler ile olan kompozitlerde ana yapıyı oluşturan bileşendir. Matris yapısı ise kompozitte yüksek dayanım ve rijitlik sağlayarak, bunun yanı sıra düşük dielektrik sabit, yüksek termal dayanım veya yüksek sürünme direnci gibi üstün özelliklerin geliştirilmesinde katkıda bulunmaktadır. Takviye amaçlı kullanılan lifler kimyasal yapılarına, yapısal morfolojilerine ve ticari kullanım alanlarına, fonksiyonlarına göre sınıflandırılabilmektedir. Kenevir gibi bitkilerden direk olarak elde edilen doğal lifler, genelde polimer matriksli kompozitlerde tercih edilmektedir. Oksitli cam lifler, silika veya kuvarz bileşimlerinden elde edilmiş amorf yapıda olup genel olarak termoplastik ve termoset polimer matriksli kompozitlerde kullanılmaktadır. Aramid lifi ise kristalin yapıdaki polimer lif çeşidi olup çoğunlukla polimer matriksli kompozitlerin takviye elemanı olarak kullanılmaktadır. Bunlara benzer çok sayıda lifli malzemeleri sıralamak mümkündür (Chang, 2001). Şekil 5.1'de bazı lif malzemeleri spesifik mukavemet ve modüller açısından karşılaştırmalı olarak verilmiştir (Chang, 2001).



Şekil 5.1.Seçilmiş takviye edici liflerin spesifik özellikleri (Chang, 2001).

Tablo 5.1' de ise yaygın olarak kompozitte kullanımı bulunan lif malzemeleri ve çeşitli mühendislik malzemelerinin mekanik özellikleri açısından karşılaştırılması verilmiştir (Memiş, 2009: www.gurit.com.2020' den).

Tablo 5.1. Lif ve mühendislik malzemelerin bazı mekanik özellikleri karşılaştırılması (Memiş, 2009: www.gurit.com,2020' den).

Malzeme	Çekme Mukavemeti (MPa)	Young Modülü (GPa)	Yoğunluk (g/cm3)
Karbon HS	3500	160-270	1,8
Karbon IM	5300	270-325	1,8
Karbon HM	3500	325-440	1,8
Karbon UHM	2000	440	2,0
Aramid LM	3600	60	1,45
Aramid HM	3100	120	1,45
Aramid UHM	3400	180	1,47
PBO lifleri	5600	180-280	1,50-1,56
PIPD lifleri	3600-6000	330-360	1,7
Dyneema®	3500	80-130	0,97
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	260-520	196	7.9

Kompozit malzemeler üretim aşamasında yüksek performanslı lifler ile birlikte kombine edildiklerinde mekanik özellikleri geliştirilmiş yüksek dayanımlı kompozit yapılar oluşturmaktadır. Kompozit yapılarda dışarıdan gelen gerilimi veya mekanik kuvvetleri lif-matris ara yüzeyinde lifin (yük taşıyan bileşen) yardımıyla tüm malzemeye iletilmektedir. Oluşan bu gerilim ve onu takip eden gerilimler, takviye elemanın transfer mekanizması yardımı ile gerilim etkisini dağıtmaktadır. Bu olay liflerin kısa veya uzun (sürekli veya süreksiz) lif yapısında olması durumunda değişiklik gösterecektir (Wagner,2019).

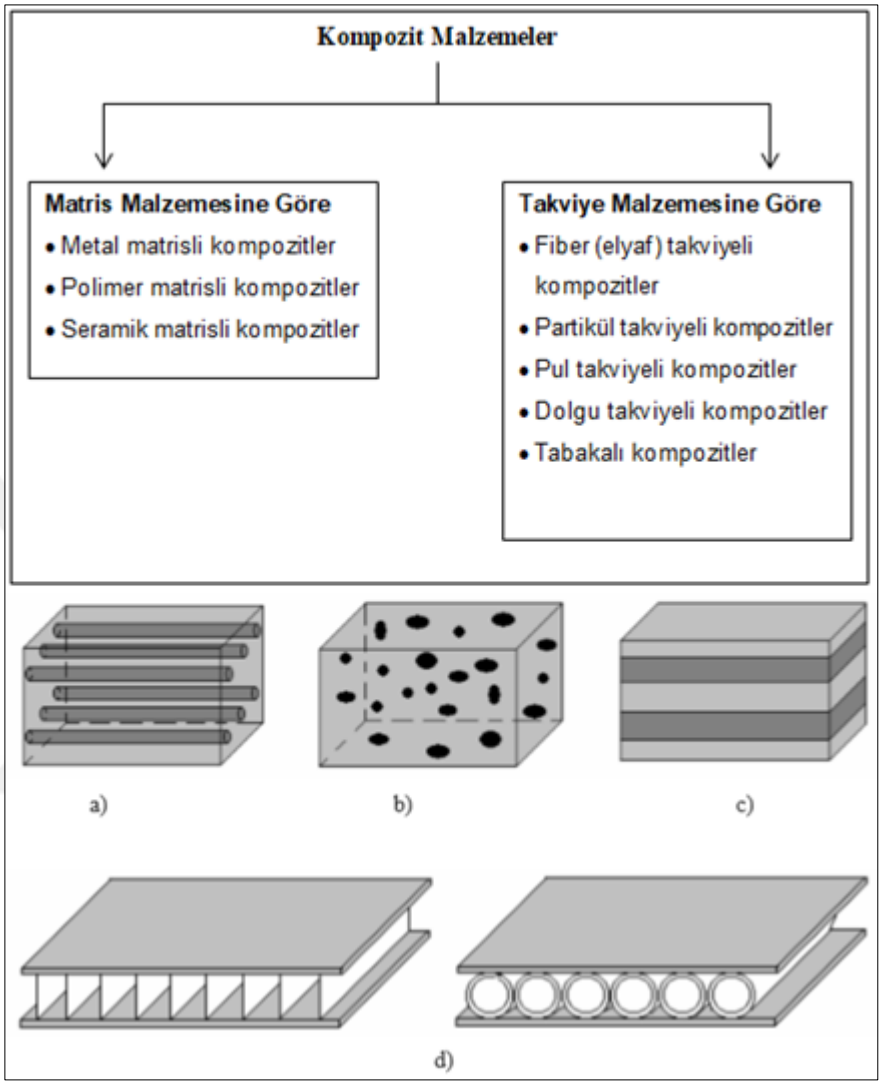
Birçok kompozit malzeme sadece iki fazdan oluşur; bunlardan biri sürekli olan ve diğer fazı çevreleyen, genellikle dağınık faz olarak adlandırılan matris olarak bilinmektedir diğer faz ise matris özelliklerini iyileştirici özellik gösteren takviye malzemenin oluşturduğu fazdır. Kompozitlerin özellikleri, bileşen fazların özelliklerinin, nispi miktarlarının ve dağılmış fazın geometrisinin bir fonksiyonudur. Burada dağınık faz geometrisi, parçacıkların şekli, parçacık

boyutuları, parçacıkların dağılımı ve oryantasyonu anlamına gelmektedir (Callister, 2007).

Birçok alanda kullanıma sahip kompozit malzemelerin geliştirilmesini sağlamak amaçlı olarak genelde, lamine yapı olarak şekillendirilen sürekli (flament) lif içermektedir. Lif malzeme, matriks malzemesinden daha rijit olduğunda mükemmel ara bağlanma bağına sahip bir lif-matriks bileşimi oluşmaktadır. Yük anında, lif yapının doğrultusunda olan ve yükün transferinin liflere geçiş mekanizması ile iletildiği varsayılarak, kompozit içerisinde eşit dağılımlı bir yapı oluşumunu sağlamak amaçlanmalıdır.

Çoğu kompozit sertlik, tokluk, bulunduğu ortam ve yüksek sıcaklık mukavemeti gibi mekanik özelliklerin kombinasyonlarına dayanımını geliştirmek için oluşturulmuştur (Callister, 2007). Bununla birlikte, üretilen kompozit malzemelerle beraber, kullanımı olmayan malzemeler ile birleştirilip, geliştirilmiş ve çeşitli endüstri kollarında kullanılma olanağı sağlanmıştır.

Kompozit malzemeleri değişik şekilde sınıflandırmak mümkündür. Matris malzemesinin türüne göre metalik kompozitler, polimerik kompozitler, seramik kompozitler vb. gibi gruplandırma yapılabildiği gibi yapı bileşenlerinin şekillerine göre de sınıflandırma şu şekilde yapılabilir; lifli kompozitler, partiküllü kompozitler, pullu kompozitler, dolgu kompozitler ve tabakalı kompozitlerdir. Bu sınıflandırılmanın gösterimi Şekil 5.2’ de verilmiştir.



Şekil 5.2. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması ve görseli a) Lif takviyeli kompozitler, b) Partikül takviyeli kompozitler, c) Pabakalı kompozitler, d) Dolgu takviyeli kompozitler (Eren, 2007)

5.2. Kompozit Malzeme Üretiminde Kullanılacak Malzemeler

Kompozit malzemeyi oluşturan malzemeler; matris malzemesi olarak bilinen ana elemanlar ve takviye elemanları olarak bilinen ara elemanlardır. Kompozit malzemelerde matrisin üç önemli özelliği bulunur. Bunlar, ara eleman olarak

kullanılacak lifleri birleştirmek, yükü lifler üzerine yaymak ve lifleri çevresel durumlardan korumaktır. Matrisin en önemli özelliklerinden biri de kullanım esnasında akışkan olup ve sonrasında tatbik edildikleri lifleri sağlam ve düzgün bir biçimde çevreler biçimde katı hale kolayca gelebilmesidir (Arıcasoy, 2006). Takviye elemanlarının özellikleri ise kompozit malzemenin dışardan aldığı etkiyi düzgün ve dayanım doğrultusunda bunyesinde absorbe etmek veya yayılımını sağlamaktır. Takviye elemanları genelde yüksek mukavemet daynımlarına sahip malzemelerden seçilmektedir.

5.2.1.Matris Malzemesi

Kompozit malzemelerde polimer esaslı matrislerin dışında metal ve seramik bazlı malzemelerde matris olarak kullanılmaktadır. Seramik ve metal bazlı marisler olmasına rağmen kompozit malzemelerin % 90'ı polimer esaslı matrislerle elde edilmektedir. Matris malzemelerinin genellikle plastik esaslı olmasından dolayı kompozit malzemeleri genel olarak takviye edilmiş plastikler olarak adlandırılmaktadır. Metal matrisler büyük çaplı uygulamalarda kullanılmak için çok pahalı ve dar çalışma alanları gerekçesiyle zor uygulanmaktadır. Seramik matrisler ise, yüksek oranda tok yapıya sahip olmalarından dolayı yeterli dayanıklılığa sahip olamamalarından kaynaklı yüksek ısı gerektiren yerler kullanımı ile sınırlanmaktadır. Karbon matrisli kompozit malzemeleri üretmek çok zor ve çok pahalı olduğu için kullanım alanları yaygın değildir. (Ulcay ve ark., 2002).

Matris Malzemelerin Özellikleri ve Matris Tipleri

Matris kompozit yapısını bir arada tutan, malzemenin üzerine gelen yükleri life dağıtmaktadır. Buna ek olarak lifin diğer etkenlerden korunmasını sağlamaktadır (Yalçın, 2012). Polimer matrisli kompozit malzemeler, oda sıcaklığındaki özellikleri, imalat kolaylığı ve maliyeti açısından, kompozit

uygulamaların büyük oranda ve çeşitli olarak ve kullanılmasını sağlamaktadır (Callister, 2007).

Kompozit malzemede liflerin yük taşıma işlevini yerine getirebilmesi için matrislerin mekanik özelliklerinin görevi önemlidir. Örnek olarak bir lif topluluğu düşünüldüğünde matris malzemesi olmadan kullanıldıklarında yükü birkaç lif taşınmakta iken, matris malzemesi kullanılan sistemlerde ise matris malzemesi yükü diğer liflerede dağıtmakta ve ek olarak lifleride çevresel koşullardan korumaktadır (Yalçın, 2012).

Kompozit malzemelerde kullanılan matris sistemleri iki çeşit olarak incelenmektedir. Bir matrisin öncelikle sağladığı mekanik özellikler yüksek sertlik ve yüksek dayanıklılık değerleridir. İyi bir kompozit malzeme sert olmalıdır, ancak gevrek bir malzeme gibi yük altında düşük performans göstermemelidir. Bu özellikleri büyük ölçüde karşılayan polimer esaslı matrisler termoset ve termoplastik matrisler olarak iki tür bulunmaktadır(Alarçin, 2014).

I. Termoset Matrisler

Termoset esaslı matrisler kompozit malzemelerde en çok kullanılan matrislerdir. Termoset polimerler sıvı halde bulunurlar, kimyasal tepkimelerle veya ısıtılarak sertleşir ve rijitleşmektedir. Termoset polimerlerin polimerizasyon süreci termoplastiklerden farklı olarak geri dönüş basamağı olmayan bir üründür. Yüksek sıcaklıklarda dahi yumuşamazlar. Çoğu termoset matris malzemeleri sertleşmemeleri için dondurulmuş olarak muhafaza edilmelidir. Dondurucudan çıkarılıp oda sıcaklığında bir müddet (1-4 hafta arası) bekletildiğinde sertleşmeye başlar ve özelliklerini kaybederek biçim verilmesi zor bir hâl alır ve kullanılamaz hal alır. Dondurucu içinde olmak şartıyla raf ömürleri ise 6 ile 18 ay arasında değişmektedir. Termoset reçineler kimyasal etkiler altında çözülmez ve olağandışı hava şartlarında dahi uzun ömürlü olmaktadırlar. Aşağıda en yoğun kullanılan matrisler yer almaktadır (Alarçin, 2014).

- Vinil ester

- Bismaleimid (BMI)
- Fenolikler
- Silikon
- Cynate Esters
- Polyester
- Epoksiler (Alarçin, 2014)

II. Termoplastik Matrisler

Termoplastik polimerlerinin çok fazla çeşitliğe sahip olmasına rağmen matris olarak kullanım alanları kısıtlıdır. Termoplastikler düşük sıcaklıklarda sert yapıda bulunmaktadırlar. Isıya maruz kaldıklarında yumuşa göstermektedir. Termosetlerle karşılaştırıldığında matris kullanımı olarak daha az kullanılmaktadır. Özellikleri bakımından üstün kırılma tokluğu, hammaddenin raf ömrünün uzun olması, geri dönüşüm kapasitesi ve sertleşme prosesi için organik çözücülere ihtiyaç duyulmamasın güvenli çalışma ortamı sağlaması gibi avantajları bulunmaktadır ve ek olarak ısıtıldıklarında yeniden şekillendirilebilir özellikleri vardır. Oda sıcaklığında katı halde bulunmasından dolayı termoplastikler soğutucuya ihtiyaç duyulmadan depolanabilmektedir. Termoplastikler yüksek sertlik ve çarpma dayanımı özelliğine sahiptir. Yeni gelişmelerle termoplastiğin sağladığı bu artı değerleri son dönem termoset matrislerinden 977-3 Epoksi ve 52450-4 BMI (Bismaleimides) reçineleri de sağlamaktadırlar (Alarçin, 2014).

Termoplastik reçineler üretilen kompozit malzemede çekme ve eğilme dayanımlarının artırılmasında kullanılmaktadır. Otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan termoplastikler uçak sanayisinde de yüksek performanslı malzeme üretiminde kullanılmaktadır. Çoğunlukla enjeksiyon ve ekstrüzyon kalıplama yöntemleri ile üretilen termoplastik malzeme üretiminde GMT (Glass Mat Reinforced Thermoplastics / Preslenebilir Takviyeli Termoplastik) olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemle hazırlanan takviyeli termoplastikler soğuk

plakaların preslenebilmesi ve geri dönüşüm sürecine uygunluğundan dolayı özellikle otomotiv sektöründe tercih edilmektedir (www.turkcadcam.net, 2020).

Termoplastiklerin kompozit malzemelerde matris olarak tercih edilmeme sebepleri üretimindeki zorluklarının yanında yüksek maliyetli olmalarıdır. Oda sıcaklığında zor işlenebilme gibi dezavantajları üretimde zaman kaybına neden olmaktadır. Devamlı kullanım sıcaklıkları 60ºC ile 245ºC arasında değişebilen termoplastik reçine çeşitleri bulunmaktadır. Bazı termoplastikleri istenilen şekilde işlenebilmesi için çözücülere ihtiyaç duyulabilmektedir. Termoplastikler termosetlerle karşılaştırıldığında daha pahalıdır. (Alarçin, 2014).

Bazı matris çeşitlerinin özellikleri

Günümüzde kompozit yapımında genellikle polimer esaslı matrisler kullanılmaktadır. Bu matris çeşitlerinden en çok kullanılan ürünlerinden bazılarının genel özellikleri ve kullanım alanları bu konu alt başlıklarında verilmiştir.

Poliester Reçine Matrikslerin Genel Özellikleri

Poliester reçine matriksi, cam lif takviyeli kompozitlerin üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kürleme işlemiyle matriks esnekliği düzenlenerek kopma dayanımı artırılabilir. Poliester reçine matrikslerin en önemli avantajları, takviye malzemelerinin nemlerinin kolayca çıkışını sağlayan düşük viskoziteye sahip olmasıdır. Bunun yanı sıra düşük maliyet ve çeşitli çevresel etkenlere karşı dayanımının geniş kullanım alanı ve kolaylığı sağlamasıdır (Yalçın, 2012).

Vinilester Reçine Matrikslerin Genel Özellikleri

Epoksi reçinelerin avantajları ile doymamış poliestere özgü olan kolay üretim ve hızlı sertleşme özelliklerini bir arada olmasını sağlamak amaçlı geliştirilmiştir. Daha çok kullanım yeri kimyasal dayanımlarından dolayı kimya tesislerinde, borularda ve depolama tanklarında kullanılmaktadır (Yalçın, 2012).

Fenolik Reçine Matrikslerinin Genel Özellikleri

Fenolik reçineler uzun yıllardan beri kullanılmaktadır. Kompozit ürünler içinde sertleşme ısıl enerjisiyle gerçekleşmekte olup laminasyon ve kalıplamada basınç uygulaması gerekmektedir. Fenolik reçinelerin ısı stabilisyonları, elektrik özellikleri, suya ve alkaliler dışındaki kimyasal maddelere dayanımları iyidir (Yalçın, 2012).

Silikon Reçine Matrikslerin Genel Özellikleri

Silikon reçineler, organik reçineler ve metal reçinelerden farklı olarak yapılarında karbon yerine inorganik esaslı olan silika bulunduran malzemelerdir. Silikon esaslı reçine matriksler, mekanik ve elektriksel özelliklerini yapısında çok az değişiklik yapılarak sıcaklık olarak 250 °C seviyesine kadar koruyabilirler. Silikon reçinelerin mekanik dayanımının organik reçinelere göre düşük olması ve maliyetinin de genel anlamda yüksek olmasından dolayı kullanım alanları kısıtlı kalmaktadır. Örnek verilecek olursa, süpersonik arabalarda kullanılmaktadır (Yalçın, 2012).

Epoksi Reçine Matrikslerin Genel Özellikleri

Epoksiler, polyester, silikonlar, üretanlar, melaminler, akrilikler ve fenolikler ile birlikte "termoset" reçine ailesi kategorisine giren reçinelerdir. Kürleştikten sonra epoksiler ısı uygulanarak eritilememektedir (Pradhan ve ark., 2016). Epoksilere uygulanan bazı kür işlemleri ile daha yüksek termal dayanımlar elde edilebilmektedir. Epoksi reçine matrikslerin sağladıkları avantajları, lif yapısında bağlarda yüksek dayanım sağlaması, aşınma direncinin yüksek olması, uçucu yapıda olmamaları, kimyasallara karşı yüksek daynımlı olması, yüksek kopma dayanımına sahip olmaları ve geniş bir sıcaklık aralıklarında sertleşebilme özelliği göstermeleridir. Dezavantajları ise poliesterlere göre yüksek maliyetli olması ve poliesterlere oranla yüksek viskoziteye sahip olmamasıdır (Yalçın, 2012). Kürleştikten sonra epoksiler ısı uygulanarak eritilemez. Bu, epoksileri tekrar tekrar

eritilebilen ve kalıplanabilen polietilen, vinil polipropilen vb. gibi diğer plastikler arasında benzersiz kılar. En yaygın kullanılan sentetik epoksi reçinesi, bisfenol A'nın (DGEBA) diglisidil eteridir. Yapışkan olarak kullanılan epoksi reçineleri formülizasyonları, basit, düşük molekül ağırlıklı alifatik reçinelerden, karmaşık ve çok işlevli aromatik reçinelere kadar değişmektedir. Yeniden kullanılabilirlik özelliğine bağlı olarak, epoksi reçineleri, "yalıtım ve döküm" işleminde, iyi yalıtım özelliklerine sahip sert, hafif ve köpüklü yapılar oluşturmak için kullanımı bulunmaktadır (Pradhan ve ark., 2016).

Epoksi reçinelerin tüm lif malzemeler ile kullanılabilmesi kolaylığı özellikle savunma, uzay ve havacılık endüstrisinde genelde karbon ve aramid lifler ile kullanım kolaylığı sağlamaktadır.

Büyük aşamalı epoksi reçineleri ile önceden dokunmuş dokuma cam, kağıt ve poliamid kumaş veya pamuk liflerden yapılmış, levhalar, çubuklar ve tüpler şeklinde sert ve rijit malzemeler yapmak için çok büyük kalıplı preslerde lamine malzeme üretimi sağlanmaktadır (Pradhan ve ark., 2016).

Poliester ve vinilesterler gibi epoksi reçineler de kimyasal polimerizasyon sonucunda sertleşme özelliğine sahiptir. Ancak yapısında bir solvent açığa çıkmamaktadır. Herhangi bir parça üretimi için epoksi reçinelerle ile çalışma süresi oda sıcaklığı koşulunda yaklaşık olarak 15 saattir. Epoksi reçinelerin karışımı yapılmış halde, soğuk ortamlarda (0 ^{o}C altında) iki aya kadar muhafaza edilebilme özelliği, prepreg (prepreg= önceden reçineyle ıslatılmış kuvvetlendirici lifler) sistemlerinde kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Prepreg tipi sistemlerde polimerizasyon yüksek ısı (75-180 ^{o}C) altında gerçekleşmektedir. Bazı tip reçineler de ultraviole ışın yardımı ile polimerize olmaktadır. Epoksiler polimerize olurken parlak pürüzsüz bir yüzey oluştururlar, bu nedenle ikinci bir yapıştırma (birleştirme) işlemi için yapışma özellikleri göz önüne alınmalıdır. Prepreg sistemlerde reçine/lif oranı kontrol edilebilmektedir. (Özek, 2005).

Epoksiler diğer polimer esaslı reçinelere göre daha pahalıdır. Bu nedenle ticari uygulamalara ek olarak, havacılık, uzay uygulamaları, otomotiv ve elektronik

uygulamaları için iyileştirme özellikleri nedeniyle önemi bulunmaktadır. Poliesterlerden ve vinil reçinelerden daha iyi mekanik özelliklere sahip ve neme karşı dayanıklı olduklarından dolayı polimer esaslı kompozitlerin elde edilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Callister, 2007; Pradhan ve ark., 2016).

Epoksiler, metallere, betona, cama, seramiğe, taşa, ahşapa, deriye vb. gibi malzemelere sıkıca yapışma kapasitesinden dolayı kullanılmaktadırlar. Bunlar esnektir; uzun hidrofobik zincirleri sayesinde kimyasal çözücülere karşı yüksek dirençli, mükemmel elektriksel yalıtım özellikleri, iyi boyutsal stabilite sağlayan, sertleşmede minimum büzülme nedeniyle ortam nemini minimum barındırma gibi birçok artı özellikleri vardır. Yüksek gerilme mukavemeti, yüksek eğilme mukaveti ve yüksek modüle sahip olma gibi özellikleri bakımından iyi seviyelerdedir (Pradhan ve ark., 2016).

Metal matrikslerin genel Özellikleri

Metaller matrisler, kompoziti bir arada tutan ve bu bütünlük içinde lifle beraber malzemenin özelliklerini belirleyen matriks malzemesi olarak yük taşıyıcılığı bakımından plastik matriks malzemeleriyle karşılaştırıldığında yüksek dayanıma sahiplerdir.

5.2.2. Takviye malzeme çeşitliliğine göre kompozitler

Kompozit üretiminde takviye malzemeleri olarak kullanımda lifler, liflerden üretilmiş kumaşlar, doğal (ağaç talaşları, mineral içerikli tozlar vb.) partüküller, seramik ve metal tozlar, parçalar veya levhalar, polimerlerden elde edilmiş parçalar, levhalar veya filmler gibi birçok malzemeler kullanılmaktadır.

Genel olarak kullanılan lif veya lif ten elde edilmiş kumaşlar kompozit üretiminde takviye elemanı (ara eleman) olarak görev almaktadır. Takviye ya da ara elamanın amacı kullanım yerine göre seçilip matris yardımı ile bir arada tutulup üstün özellikler sağlamaktır. Örnek verilecek olursa otomotiv sektöründe yapısal ve yalıtım amaçlı kompozit ürünlerde karbon lif takviyeli yada aramid takviyeli

kompozitler darbe ve yangın anında darbeyı sönümleyecek yada ısı dağılımını engelleyecek malzeme olarak kullanılmaktalardır. Savunma sanayisinde kursungeçirmez balistik koruma amaçlı zırhlarda aramid, karbon ve tıp alanında protez yapımında cam, dakron gibi liflerin takviye ve ara eleman olarak kullanımı mevcuttur. Bunun gibi birçok alanda liflerin kullanım alanları kompozit sektörü için kolay elde edilebilmeleri, kolay işlenebilir özellikte olmaları ve mekaniksel dayanımlarının yüksekliklerinden yararlanılarak kullanımı sağlanmaktadır.

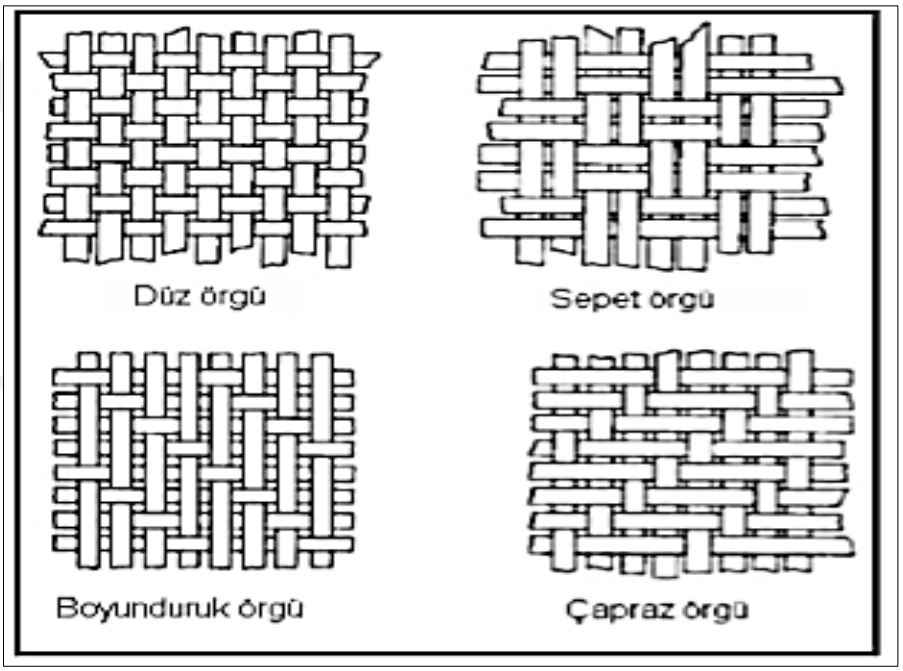
Lifler kompozit malzemede matris malzemesi içinde kullanılan en önemli dayanımı artırıcı eleman olarak yer almaktadır. Malzemeler lif halinde üretildiklerinde, kütle halindeyken sahip oldukları dayanım değerlerinin çok daha üstünde değerlere çıkmaktadır. Mesela, karbon liflerin çekme dayanımı, kütle halindeki grafitten elli kat, rijitliği ise üç kat daha yüksektir (Yalçın, 2012; Eren, 2007).

Savunma sanayinde balistik sektöründe genellikle lif ve lifden elde edilmiş kumaşlar ve bunlara ek lif ve kumaşlardan elde edilen üstün darbe ve mekanik dayanıma sahip kompozit malzemeler kullanımmaktadır. Bu alanda hala araştırmalar büyük yer almaktadır.

Bu çalışmada önceki bölümlerinde de savunma sanayinde balistik amaçlı kullanılan lifler (karbon lif, aramid, UHMWPE, vb) ve bu liflerden elde edilmiş kumaş yapılarından bahsedilmiştir. Bu lif ve liflerde elde edilmiş kumaşlardan elde edilen kompozit yapıların savunma sanayinde kullanımı oldukça geniş yer almaktadır. Kompozit malzemeler, kullanılan takviye elemanları cinsi ve geometrilerine göre; sürekli lif takviyeli, parçacık (toz yada partikül) takviyeli, dokuma lif kumaş takviyeli ve dikişli çok eksenli lifli kumaş takviyeli kompozitler olmak üzere kullanılan takviye elemanları yer almaktadır. Kompozitlerin lif takviyeli kompozitler, partikül takviyeli kompozitler, pul takviyeli kompozitler, dolgu takviyeli kompozitler, ve tabakalı kompozitler olarak takviye sınıfına göre sınıflandırılması yapılmaktadır.

Lif (Elyaf) Takviyeli Kompozitler

Mühendislikte kullanılan kompozit malzemelerin pek çoğu lif eklenerek üretildiklerinden mukavemet ve rijitlikleri kütle yapıdaki değerlerinden çok üstüne artış sağlamaktadır. Lif takviyeleri kompozitlere liflerin üstünlük sağlayan, yüksek özelliklerinden yararlanılarak eklenmektedir. Lif takviyeli kompozit üretiminde kullanılan liflerden üretilmiş kumaş türlerinde örgü çeşitlerine birkaç örnek Şekil 5.3. de verilmiştir (Eren, 2007).



Şekil 5.3. Sürekli liflerin örgü çeşitlerinden örnekler (Yalçın 2012)

Partikül Takviyeli Kompozitler

Partikül takviyeli kompozitler, rijitlik ve mukavemeti yüksek küçük granül parçacıkların takviye maddesi olarak ilavesiyle şekillendirilerek üretilen kompozitlerdir. Boyutları makroskobik olan veya çok küçük mikroskobik partiküllerin matris faz ile karıştırılarak oluşturulmuş kompozit yapılar başlıca örnekleridir. Partikül takviyeli kompozit malzemeler; dispersiyonla kürleşrtirilerek

sertleşmiş kompozit malzemeler ve büyük ölçekli partikül takviyeli kompozit malzemeler olarak iki sınıfa ayrılabilmektedir. Genel anlamda parçacık halinde kullanılan yapılar metaller ve seramikler olarak yer almaktadır.

Pul Takviyeli Kompozitler

Yüksek yük taşıma kabiliyeti olan uzunluk/çap oranında pul takviye elemanı ilavesi ile üretilmektedir. Matris içinde yer alan pulların konsantrasyonu az veya birbiri ile temas edecek derecede yüksek değerlerde de olabilmektedir. Düzlemsel görünüme sahip pul parçaları ile sık bir paketleme elde edilebilebilir. Pul esaslı sistemin maliyeti fazla, ancak mukavemeti yüksektir" (Eren, 2007).

Dolgu Malzemesi Takviyeli (Sandviç)Kompozitler

Üç boyutlu sürekli bir matris malzemesinin yine üç boyutlu dolgu maddesi ile doldurulması veya emprenye edilmesi ile oluşan kompozit malzemelerdir. Petekli yapılar, hücreler veya süngerimsi gözenekli yapılar arasında metalik, organik veya seramik dolgu malzemeleri yer alabilmektedir. Optimum özellikli yapıların oluşması için birbiri içinde çözünmeyen, kimyasal reaksiyona girmeyen bileşenlerin seçilmesi gerekmektedir. Bu tarz petekli ya da hücreli yapıdaki kompozitler dolgu malzemesi takviyeli (sandviç) kompozitler olarak adlandırılır (Eren, 2007).

Tabakalı Kompozitler

Çok değişik kombinasyonlarla tabakalanmış yapılarda kompozitlerin üretimi mümkündür. Farklı özelliklerde en az iki tabakanın kombinasyonundan oluşmaktadır. Bu yapıdaki kompozitlerle korozyon direnci zayıf metaller üzerine, daha yüksek dirençli malzemeler ile kaplanmasıyla korozyon özelliğinin, yumuşak metallerin sertlik sağlayacak malzemelerle birleştirilmesiyle sertlik ve aşınma direncinin, farklı yönlenmiş lif yapıları ve tek tabakaların birleştirilmesiyle çok yönlü yük taşıma özelliğinin kazanımları sağlanmaktadır (Eren, 2007).

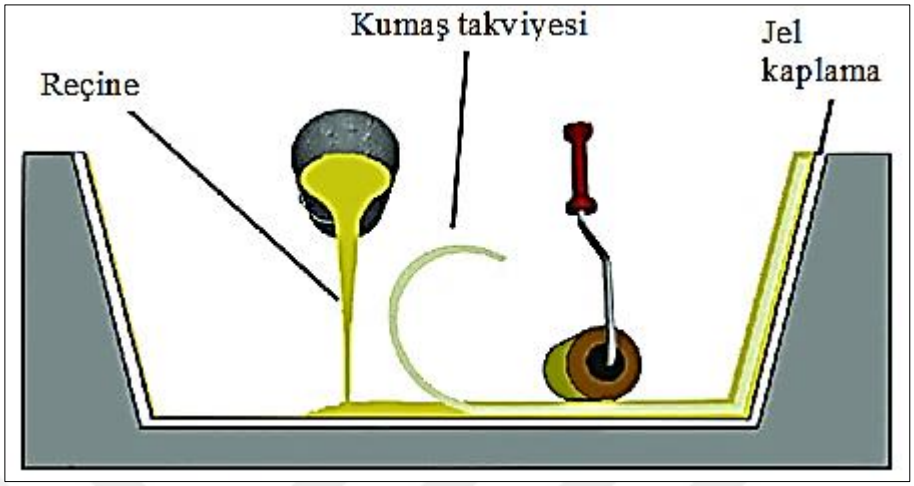
5.3.Kompozit Malzeme Üretim Yöntemleri

Kompozit üretiminde ilk olarak düşünülmesi gereken parametre üretim maliyeti olmalıdır. Ancak deneysel amaçlı küçük çapta üretimler için bu parametre göz ardı edilebilmektedir. Üretim maliyetini, dayanım performansı, kullanım yeri, malzeme seçimi ve şekil verme yöntemleri gibi parametreler etkilemektedir. Kompozit malzemeyi oluşturacak malzemelerin kullanım yeri ve özelliklerine uygun şekilde seçilmesi, üretim maliyetlerini azaltmada ana etken olmaktadır. Tasarım ile üretim maliyetinin düşürülmesi her zaman için geçerli bir yöntem olmakla beraber buna göre tasarım planı yapılmalıdır. Dayanım ve tokluk gibi özellikleri, düşük ağırlık, yüksek sıcaklıkta kullanılabilirlik, yorulma dayanımı, bakım masrafı düşük, korozyon dayanımı ve tamir kolaylıkları gibi etkenlerle birlikte düşünülerek, en düşük maliyetle, en kolay üretilebilen bir kompozit üretim planı yapılmalıdır.

Kompozit malzemelerin üretiminde, el yatırma yöntemi, kapalı kalıpta soğuk veya sıcak pres yöntemi, vakum infüzyon yöntemi, pultrüzyon yöntemi, püskürtme yöntemi, filaman sarma yöntemi, otoklav yöntemi ve reçine transfer yöntemi gibi çeşitli yöntemler kullanılmaktadır.

5.3.1.Elle Yatırma (Hand Lay Up) Yöntemi

Elle yatırma yöntemi, bir kalıba elle yerleştirilen kumaşlara (lif) bir rulo veya fırça ile reçinenin emdirilmesi esasına dayanmaktadır. Daha sonra reçine emdirilmiş kumaşlar reçeteye ve kullanılan matris malzemesine göre sıcak ve basınç altında pişmeye/kurumaya bırakılmaktadır. Reçineler kumaşlara kat kat yedirilebildiği gibi kumaşın özelliklerine bağlı olarak çok katmana aynı anda da reçinede sürülebilir (Arkaz, 2016). Şekil 5.4’ de uygulanma yöntemi gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Elle Yatırma Yönteminin Gösterimi (Rajı ve ark. 2018)

Bu yöntemde herhangi bir termoset reçine (epoxy, polyester, vinylester, phenolic) kullanılmaktadır. Takviye malzemesi olarak ise Cam, karbon, aramid vb. lif çeşitleri kullanılaktadır. Ancak ağır aramid kumaşların bu yöntemle ıslatılması (reçine emdirilmesi) zordur (Arkaz, 2016).

Elle yatırma yönteminin prensibi basınç uygulaması olmadan reçinenin life yedirilmesi ile kalıbın şeklinin alması ile üretim sağlayan yöntemdir. Elle yatırma yöntemi işlem basamakları şöyledir;

- Uygun malzemelerin seçilmesi,
- Gerekli miktarların hesaplanması,
- Kalıbın hazırlanması,
- Jelkot uygulaması (isteğe bağlı),
- Lifin yeterli reçineyle ıslatılması,
- Kalıptaki kompozitin kürleşmesi için uygun şartlarda bekletilmesi,

olarak sıralanabilmektedir(Yalçın, 2012)

El yatırma yöntemi kullanılarak üretilecek olan kompozitteki malzemeyi oluşturan hammadde malzemelerinin miktarları ve çeşitleri belirlendikten sonra gerekli olan kalıbın hazırlanması işlemine geçilir. Üretimde, kalıbın temizliği önem arz etmektedir. Kalıp yüzeyinde kirlilik bulunmamasına dikkat edilmelidir. Daha önceleri kullanılan kalıplarda kalıp ayırıcının tamamen temizlenmesi gerekmektedir. Kalıp ayırıcı, üretici firmanın verdiği sünger yada kazıyıcı yardımı ile kullanım kılavuzundaki doğrultular ile uygulanmalıdır. Kalıp ayırıcı sürme işleminden sonra kalıp üstündeki kalıp ayırıcının kuruması beklenmelidir. Eğer yeteri kadar kalıp ayırıcı sürülmez veya yeteri kadar kuruması için beklenmez ise ürün kalıba yapışabilir.

Çalışma şartları olarak kullanılacak ortam sıcaklığı en az 10°C olmalıdır, eğer sıcaklık bu değerin altındaysa, katalizör veya sertleştirici oranı artırılmalıdır. Eğer sıcaklık 5°C veya altındaysa, ortam şartları iyileştirilerek üretime başlanmalıdır. Üretim sırasında havanın nemden uzak kuru bir hava ortamında olması gereklidir. Havadaki neminde bulunan su zerrecikleri, reçinenin tam olarak işlevini yerine getirmesini engellemektedir. Bu durumun oluşturacağı hatalar kimyasal katkılar yardımı ile düzeltilemez durumdadır (Yalçın, 2012). Jel kot ise ürünün yeteri kadar parlak ve istenilen renkte çıkmasını sağlamak için uygulanmaktadır. Bu durumda jel kot ürünün yüzeyinde parlak cilalanmış bir görüntü katmaktadır. Eğer renksiz yada parlak olmayan bir ürün elde edilmek isteniyor ise jel kot uygulamasına gerek yoktur. Ancak renkli bir ürün elde edilmesi isteniyorsa reçine içerisine renk pigmentiyle katkıda bulunarak hava kabarcıkları olmayacak şekilde karıştırılır. Reçine katalizör yardımı ile aktif hale getirildikten sonra jelkot geniş ve yumuşak bir fırça yardımıyla kalıp yüzeyine tek yönde tek kat şeklinde sürülmeli, fırça aynı anda hem ileri hem de geri yönde kullanılmamalıdır. Bunun sonunda jel kot kalınlığı (0,25-0,50) mm aralığında olmalıdır. İlk kata sürülen jel kottan sonra ikinci kat sürülmeden önce alttaki jel kotun donması veya dokunulduğunda yapışkanlık özelliğini kaybetmiş olması gerekmektedir.

Kompozit için alınmış olan matris malzemesinde üreticiden alındığında yanında katkı malzemesi olarak hızlandırıcısı ile beraber gelmektedir. Üretici beraberinde gönderdiği hızlandırıcının matris karışım oranını bildirmelidir. Bu malzemeler reçine uygulandıktan sonra çok iyi şekilde karıştırılması gerekmektedir. Eger gerek duyulursa hava kabarcıklarının giderilmesi için reçine bulunan kap bir süre bekletilmelidir.

Reçine hazır hale geldikten sonra katalizör yardımıyla sertleştirilmesi hızlandırılır. Katalizör katılma oranı çok kritik değildir. Ancak kullanım koşullarındaki tavsiye edilen oranlarda uygulanması gerekmektedir. Hızlı bir jelleşme zaman aralığı isteniyorsa ya da üretim ortamı sıcaklığı düşük durumda ise katalizör malzeme oranı artırıla bilir ya da tam tersi koşullarda azaltıla bilmektedir.

Jel kottan sonra matris malzemesi sertleştirici karıştırılarak bir kat olarak jelleşmiş matris jel kot üzerine sürülür. Daha sonra bunun üzerindeki yüzeye uygun kesilmiş kumaş malzemesi ya da lif malzemesi (takviye malzemesi) yatırılmalıdır. Takviye malzemesi yatırıldıktan sonra fırça yardımı ile takviye malzemesinin matris malzemesini emmesi sağlanmaktadır.

Bu işlemler sonunda kenarlara taşmış olan reçine jelleşmeden keskin bir alet yardımıyla kesilerek temizlenir. Bu işlem yapılmadan önce tüm takviye malzemesinin kullanılan matris malzemesinin tam anlamıyla emdiğinden emin olunmalıdır. Bunun anlaşılması için takviye malzemesinin üzerindeki beyazımsı rengin kullanılan epoksinin rengine (genelde şeffaf) görünüm kazanması ile anlaşılmaktadır. Böylelikle oluşacak kompozit üzerinde farklı bir renk kalmayana kadar matris malzemesinin takviye malzemesi tarafında tamamen emildiğinden emin olunmalıdır. Bunun yanı sıra takviye malzemesi matris malzemesi içine iyice oturtulmuş ve bastırılmış bir şekilde matris malzemesini emecek durumda olmalıdır aksi durumda hava kalan bölgelerde kompozitte zayıflık görülecektir.

Bu kompozit üretim yöntemi ile köşeleri keskin olan kalıplarda köşeleri tam kaplama sorunu oluşabilmektedir daha çok oval şekilli kalıplar için basit yapılar üretiminde kullanılan yöntemdir.

Avantajları;

- Öğrenilmesi ve uygulanması çok kolay,
- Özellikle oda sıcaklığında pişen reçinelerin kullanımında düşük maliyet,
- Yönteme uygun malzeme temini çok kolaydır,
- Spreyleme' ye oranla daha fazla lif yoğunluğu ve sürekli (uzun) lif kullanım

Avantajlarına sahiptir.

Dezavantajları;

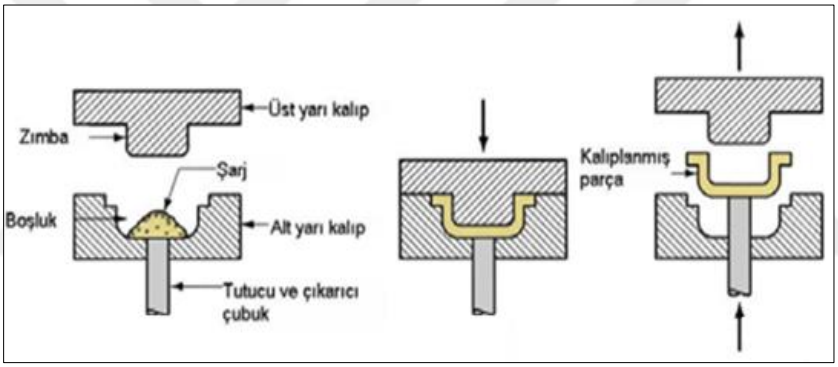
- Yöntem laminasyonu (tabakalama) yapan kişinin el becerisine çok bağlıdır
- Yüksek yoğunluklu lifin Hacimsel Yoğunluğu' na ulaşmak çok zordur.
- Reçine oranı düşük tutulmak istendiğinde yüksek oranda hava boşlukları ve ıslanmayan bölgeler meydana gelebilir
- Bu yöntemde kullanılan reçinelerin yoğunluğu ve viskozitesi düşüktür.
- Bu tür reçinelerin insan Sağlığı açısından ağır moleküllü reçinelere oranla daha zararlıdır.
- Pahalı havalandırma sistemleri olmaksızın Polyester ve vinilester için havaya karışan Styrene konsantrasyonunu yasal sınırlarda tutmak zordur (Arkaz, 2016).

Kullanım alanları; Rüzgâr türbin kanatları, plakalar, tekne üretimi, mimari amaçlı kalıplamalarda, vb. düz yüzey çalışmaları daha çok tercih edilmektedir.

5.3.2. Kapalı kalıpta soğuk veya sıcak pres yöntemi

Soğuk pres (ıslak pres yöntemi) ve sıcak pres yöntemi takviye malzemelerin lif keçelerin ve/veya dokuma kumaşların parça şekline göre kesilerek kuru kalıp içine yerleştirilmesiyle gerçekleştirilen bir yöntemdir.

Kapalı pres yönteminde genellikle hidrolik pres kullanılarak, kalıp içerisine el yatırma yöntemindeki gibi elle yatırılmış matris ve takviye malzemesi yerleştirilir, belirli bir basınç altında tutularak, kalıp içerisinde malzemede bozulma olmadan kürleşmesi hedeflenmektedir. Üretim sonrasında yapılan kür işlemlerinden sonra malzeme dayanımı artmaktadır. Şekil 5.5.'de presleme yöntemi şekil olarak anlatılmıştır.



Şekil 5.5. Presleme ile kompozit malzeme üretim yöntemi. (Vural, 2020)

5.3.3. Vakum İnfüzyon Yöntemi

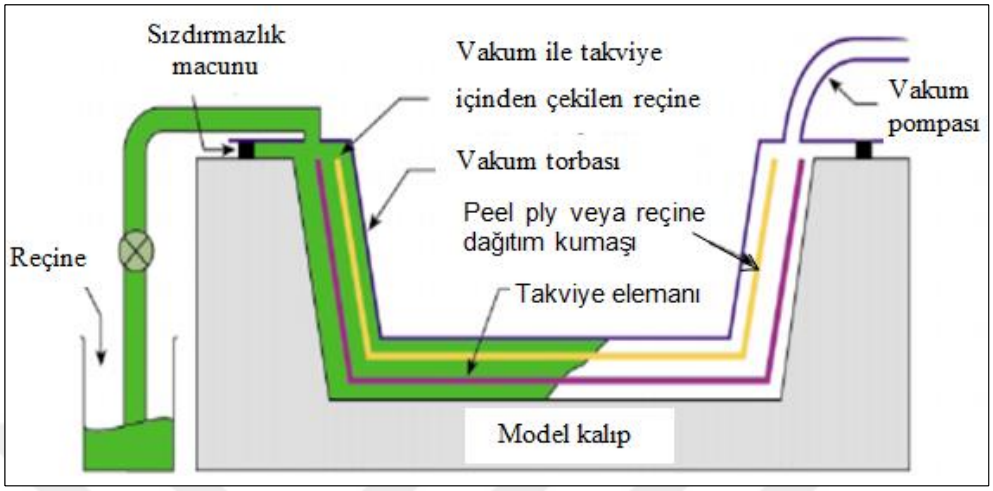
Bu yöntemi; vakum ortamı içerisinde reçinenin takviye malzemesi içerisine kalıp yüzeyi boyunca ilerlemesi prensibi ile çalışmaktadır. Bu yöntemle üretimin amaçlarından biri el yatırma ve pres yöntemindeki olduğu gibi değil el değmeden hazırlanması amacı doğrultusunda üretim sağlamaktır. En büyük avantajlarından biri reçine sarfiyatı hakkında bilgi edinilip bu sarfiyatın kontrol altında tutulabilmesini sağlanmaktadır. El yatırmasındaki gibi kişiye bağlı olarak reçine sarfiyatı olmamaktadır. Matris malzemesi reçinenin takviye elemanı lif yüzeyine dağılımı veya kumaş tarafından emilmesi her bölgesinde aynı olacağından,

malzeme içerisinde reçine birikintisi veya kumaşların katlanması problemleri olmayacaktır. Bu durum ürünün yüzey ve yapısında homojen dağılım elde edilmesini sağlamış olacaktır. Vakum naylonu altından reçine ilerlemesi sağlanacağından dolayı dışarı ile herhangi bir bağlantısı olmadan üretimi sağlanmış olacaktır. Ayrıca üretimde oluşabilecek zehirli gazlarında dışarıya yayılması önlenmiş olmaktadır.

Vakum infüzyon yönteminde vakum uygulandığı için fazla matris malzemesi olan reçinenin çekilmesi ile daha yüksek oranda lif/reçine(matris) malzemesi oranı sağlanmış olmaktadır. Ayrıca vakum uygulamasının avantajı olarak elde edilecek olan her katmanlar arası reçinenin tam nüfuz etmesi sağlanacaktır. Bu yöntemle içerisinde hava kabarcıklarının oluşmadığı bir yapı üretimi mümkün olmakta ve bütün bölgelerin reçineyle ıslanmış olmasını sağlamaktadır (Şekil 5.6.).

Vakum infüzyon yöntemi uygulanışı;

- Kuru kumaşlar (lif) bir kalıp içerisine yerleştirilir.
- İstiflenmiş kumaşlar (laminate), vakumlamaya ait plastik bir vakum filmi(muşambası) ve çift taraflı yapışkan sızdırmazlık macunları kullanılarak dış ortamdan izole edilmektedir.
- Laminenin' in üzerine bir ayırıcı film (geçirgen tabaka) tabaka ve reçinenin dağılmasında yardımcı olan dağıtıcı tülbent tabaka konur.
- Vakum yardımı ile reçinenin kumaşlar arasından ve yüzeyinden çekilerek kumaşın her yerine aynı oranda nüfuz etmesi sağlanmaktadır.



Şekil 5.6. Vakum infüzyon yöntemi. (Beşergil, 2020)

Avantajları;

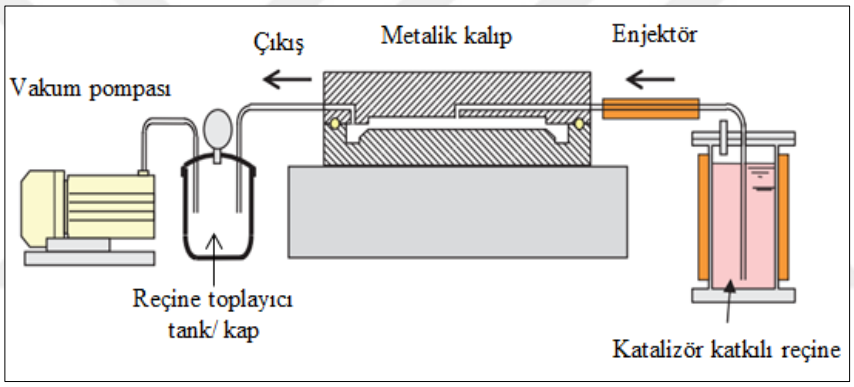
- Tek taraflı kalıp kullanılmaktadır.
- Yüksek mukavemetli kalıba ihtiyaç yoktur
- Kalıp ve üretim maliyeti RTM yöntemine göre düşük maliyetli
- Büyük parça üretimine olanak sağlamaktadır
- Hand lay-up (elle yatırma) yönteminde kullanılan kalıplar ufak modifikasyonlarla bu yöntemde kalıp olarak kullanılmaktadır
- Ana yapılar bir seferde (tek adımda) üretilebilir (Durgun, 2014).

Dezavantaj;

- İşlem basamakları kısmı olarak kompleks yapılıdır
- Düşük viskoziteye sahip reçine kullanımı mekanik özellikleri olumsuz etkiliye bilir
- Reçinenin tam nüfuz etmediği kuru bölgeler kalabilir buda pahalı atık malzeme anlamına gelir. (Durgun, 2014)

5.3.4. Reçine transfer kalıplama (resin transfer molding) RTM

Vakum İnfüzyon yöntemine göre RTM' nin farkı burada Jelkot uygulanmış birbirine geçmeli iki kalıp (dişi ve erkek) kullanılmaktadır. RTM için özel olarak üretilmiş takviye malzemesi kalıp içine yerleştirilmektedir. Kalıplar birbirinin üzerine gelecek şekilde kapatılır ve malzemeye basınç yardımıyla reçine enjekte edilmektedir. Bazı uygulamalarda reçinenin düzgün dağılım sağlayabilmesi ve düzenli ilerleyebilmesi için de takviye olarak vakumlama yapılmaktadır. Genellikle, 2-10 mm cidar kalınlığına ve lif oranı ise %20-30 aralığına sahip kompozit ürünler elde edilebilmektedir. Şekil 5.7 de vakum takviyeli reçine transfer kalıplama yöntemi gösterilmiştir.



Şekil 5.7. Vakum takviyeli reçine transfer kalıplama yöntemi (Ben ve ark. 2015)

Reçinenin uygulanmasında başlıca etkenler;

- Reçine vizkositesi lifleri ıslatıp aralarından sızacak kadar düşük olmalı,
- Yüksek sıcaklıkta hızlı sertleşmeli (minimum kalıplama süresi sağlamalı)
- Soğuma sırasında minimum bekleme olmalı,
- Kalıptan kolay çıkmalı
- Takviye malzemelerindeki organik bağlayıcılar reçinede çözünmemeli

- Bu yöntemle karmaşık parçalar üretilebilir. (Concorde uçaklarında, F1 arabalarında vb. ileri teknoloji araçlarında bazı parçalar) bu yöntemle üretilmektedir.

Avantajları;

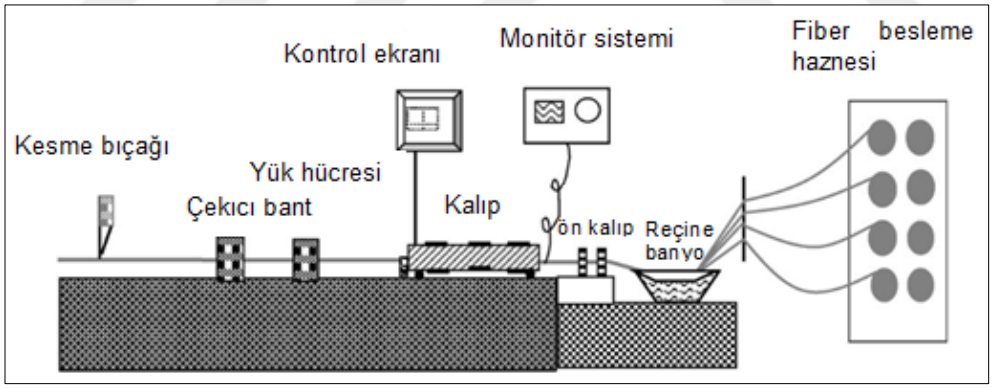
- Üretim hızı yüksek
- lif reçine oranı ve boşluk miktarı çok iyi şekilde kontrol edilebilmektedir. Böylece, lif oranı yüksek, hava boşluğu hataları az ürünler elde edilebilir.
- Karmaşık şekilli parçaların boyut/tolerans ayarı çok hassas yapılabilmektedir
- Üretilen tüm parçalar homojen yapıdadır.
- Kapalı ortam üretimi yapıldığı için sağlık ve güvenlik bakımından avantajlıdır
- Bazı yöntemlere göre daha düşük iş gücü ile üretimi sağlanabilir buda maliyette düşüklüğe sebep olmaktadır.
- Malzemenin her iki yüzeyi de düzgün ve istenilen temizlikte çıkmaktadır.

Dezavantajlar;

- Çift kalıp kullanılması iki kalıp olması pahalı, basınç yüküne dayanacak rijitlikte olması sağlanmalıdır. Buda ağır metal kalıp anlamına gelmektedir.
- Üretim genellikle kompleks ve küçük parçalardır. Buda, maliyeti yüksek, kalıp tasarımı zor olması anlamına gelmektedir.
- Reçine etki etmediği yüzeylerde yüksek maliyet gerektiren atık malzemelerine sebebiyet verebilmektedir.

5.3.5.Pultrüzyon Yöntemi

Pultrüzyon, üniform kesit alanında takviye edilmiş malzemenin sürekli üretim yöntemidir. Takviye elemanı olan her bir lifin, iyice ıslanması amacıyla sıvı reçine banyosunda ıslanmasının sağlanmasıdır. Sisteme beslenen sürekli takviye malzemesi, reçine banyosundan geçirildikten sonra (120-150) °C arası sıcaklıkta ısıtılmış şekillendirme kalıbında sertleşmesi sağlanır. Malzeme ısıtılmış kalıba ilerlerken reçine jel formuna ve daha sonra da kürlenmiş, rijit bir plastiğe dönüşmektedir. Kalıplar genellikle krom kaplı çelik malzemedendir. Kalıplar, liflerin emdirilmesini sağlar ve reçine içeriğini kontrol eder ve son olarak da malzemenin kürlenmesini sağlayacak şekilde dizaynedilmelidir. Bir çekme cihazı kür edilmiş malzemeyi kalıp içinden tutarak kalıptan tamamen çıkartmaktadır. Ürün kalıptan çıktıktan sonra istenilen uzunlukta kesilir. Pultrüzyon, oldukça ekonomiktir. Uzun, üniform şekiller için ideal bir üretim yöntemidir. Şekil 5.8' de pultrüzyon yönteminin üretim akım şeması verilmiştir (Yalçın, 2012).



Şekil 5.8. Pultrüzyon sürecinin şematik gösterimi (Chandrashekhara ve ark., 2005)

Avantajları;

- Pultrüzyon (çekme) düşük maliyetli, hızlı üretime imkân veren, sürekli ve otomatik bir prosestir.
- Reçine oranı doğru bir şekilde kontrol edilebilir.

- Lifler iplik halinde kullanıldığı için daha ekonomiktir.
- Düzgün liflerden oluşan, yüksek lif hacimsel oranlarına sahip ürünlerin yapısal performansları yüksek olabilmektedir.

Dezavantajlar;

- Sadece sabit kesitli parça üretimi ile sınırlıdır.
- Isıtılmış kalıp kullanımı maliyeti enerji sarfiyatı ile arttırıcı bir faktördür.

5.3.6. Püskürtme (sprey) Yöntemi

Bu yöntemde kırpılmış lifler ve aynı anda reçine, kalıp yüzeyine düzgün bir şekilde püskürtülmektedir. Lifleri kırpmak ve kırpılmış lifleri, reçine-katalizör püskürtme akımına ilave etmek için özel bir aparat kullanılmaktadır. Reçine ve katalizör tek bir tabanca içerisinde karıştırılabilir ya da iki farklı tabancadan düzgün bir akım içerisinde püskürtülebilmektedir. Püskürtme işleminden sonra, kalıp yüzeyindeki lif ve reçine karışımı içinde kalan hava, bir rulo yardımıyla üstünden baskı uygulanarak alınabilir. Düzgün bir yüzey elde etmek için kumaşlar zemine düzgün şekilde yatırılmalıdır. Kürlenme oda sıcaklığında gerçekleşir ya da ısı ile hızlandırılabilir. Püskürtme yönteminde, polyester ya da epoksi reçineler kullanılmaktadır (Yalçın, 2012).

Püskürtme yöntemi birçok açıdan elle yatırma yöntemine benzerlik göstermektedir. Her iki yöntem içinde içeride kalan hava tam olarak dışarı çıkartılmalı, reçine ve katalizör dikkatli şekilde karıştırılmalı ve kürlenmelidir. Bununla birlikte püskürtme yönteminde ana takviye olarak sadece kırpılmış lifer kullanılmaktadır. Bunun anlamı, lif ve reçine oranının püskürtme yöntemindeki en büyük değişken olmasıdır.

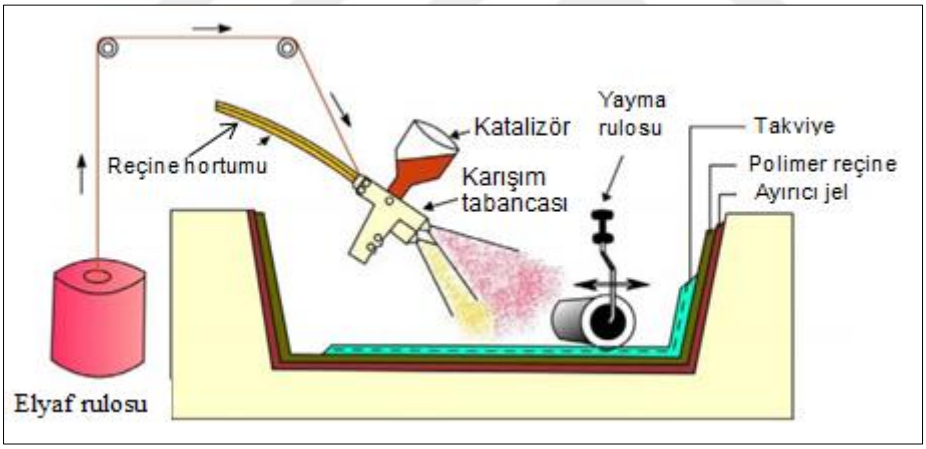
Püskürtme yönteminde lif ve reçine aynı hazneden ya da reçine sadece yüzeye püskürtülerek kullanılmaktadır Şekil 5.9'da sprey lay up (püskürtme) yöntemi ile kompozit üretim gösterimi şematik olarak verilmiştir.

Avantajları;

- Kısa sürede düşük maliyetli üretim
- Uygulama kolaylığı
-

Dezavantaj;

- Kısa liflerden dolayı sınırlı mekanik özellikli parça üretimi
- Yüksek styren içeriği nedeniyle sağlık açısından zararlılığı
- Havaya karışan styren miktarını yasal sınırlar doğrultusunda tutmak zordur.
- Düşük viskosite nedeni ile spreyleme esnasında açığa çıkan partikül ve gazların kıyafet ve etrafa dağılıp yapışarak zarar vermesidir.
- Komplex şekilli malzeme üretiminde kullanılamamasıdır.

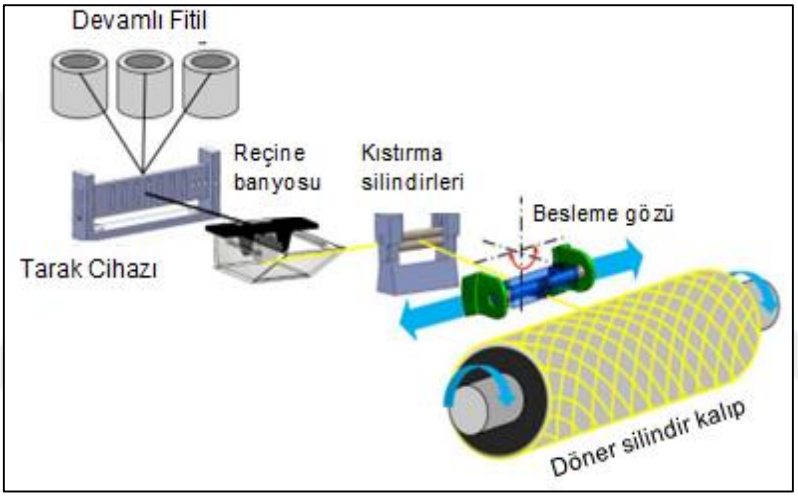


Şekil 5.9. Püskürme yöntemi ile kompozit malzeme üretimi (www.eppcomposites.com, 2020)

5.3.7. Lif (Elyaf) Sarma (Filament Winding) Yöntemi

Bu yöntem, genel olarak içi boş (boru ve tank gibi) parçaların üretiminde kullanılmaktadır.

Bobinlere sarılı olan lif bir reçine banyosundan geçirilmektedir. Reçine emdirilmiş lif hareketli bir mekanizma ile belirli bir mesafe üzerinde dönen merdane şeklindeki kalıbın üstüne istenilen oryantasyonda (açılı) sarılmaktadır. İstenilen kalınlığa veya katman sayısına ulaşıldığında kalıplama işlemi bitirilmektedir. Daha sonra kurutma işlemi sağlanmaktadır. Kurutma işleminden sonra kompozit ürün hazır hale gelmektedir. Şekil 5.10'da flament sarma yöntemi ile kompozit boru üretim akım şeması verilmiştir.



Şekil 5.10. Filament sarma yöntemi ile kompozit üretim şeması (Quanjin ve ark. 2019)

Avantajları;

- Malzeme sarımı hızlı ve ekonomik bir yöntemdir.
- Reçine oranı elle yatırma yöntemine oranla daha iyi kontrol edilebilmektedir.
- Bobine sarılı durumda ki lifler ikincil bir işlem basamağından geçirilmeden kumaş haline gelmedikleri için maliyet konusunda biraz daha düşüktür.

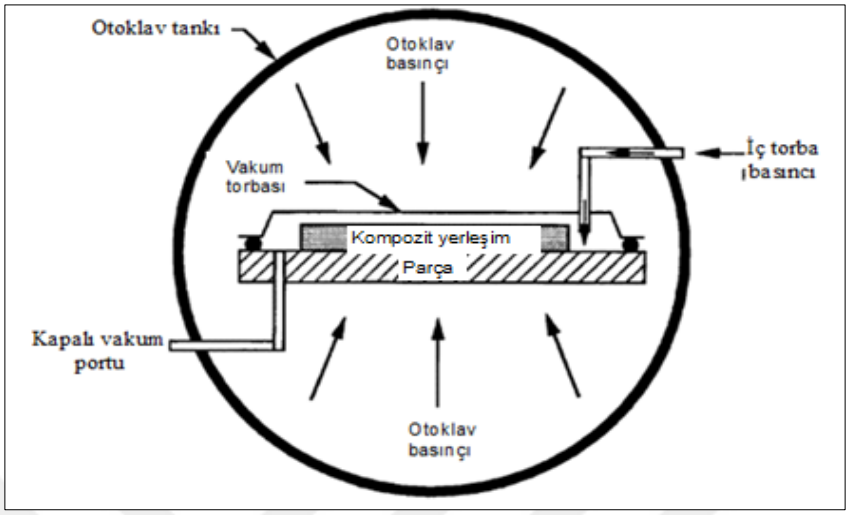
- Her eksenel sarım olacağı için değişik yönlerdeki kuvvet yüklemelerinde mukavemet dayımı yüksek olacaktır.

Dezavantajları;

- Uygulama alanında kompleks yapıdaki malzeme üretimleri yapılamamaktadır.
- Büyük parçalar için merdaneler pahalı olmaktadır
- Düzgün bir yüzey elde edilmesi için kuruma sonrasında dış yüzey işlemleri gerekir buda maliyeti artırmaktadır.
- Düşük viskositeye sahip reçineler kullanılmaktadır ve buda çeşitli sağlık sorunlarına ve mekanik özelliklerde düşüklüğe sebep olmaktadır.

5.3.8. Otoklav Pişirme (Autoclave Cure)

Otoklav kalıplama, vakum infüzyon yönteminin modifiye edilmiş halidir. Bu gelişmiş kompozit malzeme üretim yöntemi, yoğun ve boşluksuz kalıplama yapılmasını sağlamaktadır. Sebebi ise, kürlenme için yüksek sıcaklık ve basınç kullanılıyor olmasıdır. Bu üretim yöntemi; uçak, uzay aracı ve füze gibi araçların parçalarının üretiminde kullanılmaktadır. Ön emdirilmiş yüksek dayanımlı liflerden elde edilmiş yüksek dayanım/ağırlık oranına sahip malzemeler üretmek için oldukça yoğun şekilde kullanılmaktadır. Otoklavlar; basınç ve sıcaklığın kürleşmenin olması için gerekli olduğu, kalıpta vakum torbası içinde ısıtılmış lifli basınçlı kaplardır. Kür basıncı, işlemlere göre değişiklik göstermekte genellikle (3,4-6,8)atm arasındadır ve kürleşmenin oluşması uzun zaman almaktadır. Epoksi gibi yüksek sıcaklık matriks reçineleri kullanılmaktadır. Otoklav boyutu, üretilecek parça boyutunu sınırladığı için dezavantaj sağlamaktadır (Yalçın, 2012). Şekil 5.11 de gösterilen şekil otoklav ortamında kompozit üretim yöntemi verilmiştir.



Şekil 5.11. Otoklav sisteminde kompozit malzeme üretim gösterimi (Campbell 2004).

Avantajları

- Yüksek dayanım/ağırlık oranına sahip malzeme üretimi
- Yüksek seviyede lif hacimsel yoğunluğu
- Basınçlı pişme ve düşük hava boşluklu ürünler
- Büyük parça üretimi ya da aynı anda birden fazla küçük parça üretimi
- Basınç ve sıcaklık çok iyi kontrol edilebilme özelliği vardır.

Dezavantajları;

- İlk yatırım maliyeti yüksek seviyelerde olması,
- Termoplastik prepreng kullanımında termosetlere göre yüksek sıcaklık ve basınç ihtiyacı duyulmasıdır.

5.4. Balistikte Tekstil Takviyeli Kompozit Ürünler ve Çalışmalar

Balistikte personel koruma amaçlı olacak şekilde darbelere dayanıklı kompozitlerin geliştirilmesi son zamanlardaki en önemli trendlerden biri olmuştur.

Balistik malzemelerde istenilen yüksek enerji emilimi ve azaltılmış ağırlık, bu kompozitleri kullanım avantajı olarak ön plana çıkmaktadır.

Balistik amaçlı koruma alanında kullanılan tekstil ürünlerinden gerek yalın olarak gerekse birçok ürün veya madde karışımı ile elde edilen kompozit ürünler bulunmaktadır. Örnek olarak balistik kumaşların çok katlı olarak kullanılması yalın bir kullanım olurken bu kullanılan kumaşların kat sayısını azaltıp çeşitli polimer veya daha güçlü yapıya getirecek maddeler ile birleştirilmesiyle de balistik koruma amaçlı daha dayanıklı ve daha hafif kompozit ürünler elde edilmiştir. Yukarıdaki bölümde kompozit malzemelerin üretim yöntemlerinden bahsedilmiş olup bu kısımda ise çalışmanın ana amacı olan balistikte tekstil takviyeli kompozit ürünler hakkında geniş ve olağanca güncel çalışmalara yer verilmiştir.

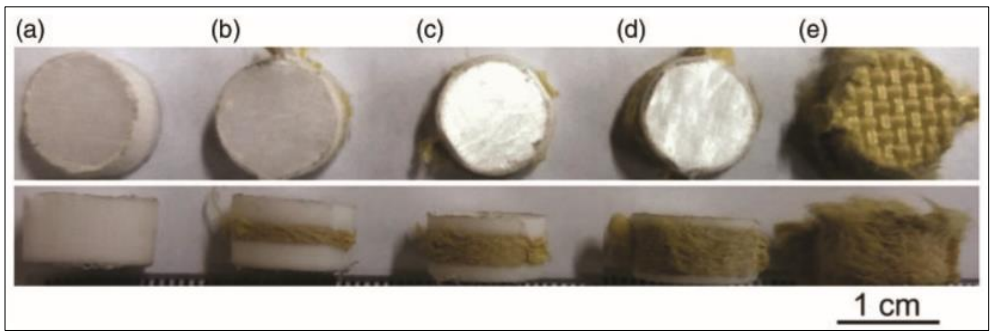
Silva ve ark. (2019) yapmış oldukları Ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen(UHMWPE) laminatlar ve aramid kumaşlar kullanılarak taşıt balistik koruması için çok katmanlı kompozitlerin geliştirilmesi adlı çalışmalarında; otoklav kalıplama yöntemi ile Ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE) laminatlardan ve aramid lifli kumaşlardan oluşan hibrit kompozitler elde etmişlerdir. Dinamik sıkıştırma testi, standart deformasyon hızına sahip bir Split Hopkinson basınç çubuğu kullanılarak gerçekleştirmişlerdir. Balistik limit V_{50} testi askeri standart MIL-STD-662F'yi baz alarak gerçekleştirilmiştir. Balistik NIJ Standard 0108.01 referans alınarak ve 9mm Luger FMJ ve 44mm Mag Lead SWC EXPP mühimmatı kullanılmıştır. Hibrit kompozitlerin dinamik-mekanik özellikler değerlendirilmiştir. [0˚/90˚] yönlendirilmiş polietilen filmle kaplı liflere sahip, 0.109kg.m^{-2} yoğunluklu ve düz örgü aramid kumaşlar (K29 3000d S745), 0.439kg alansal yoğunluğu ile UHMWPE laminat (HS BD001-30A) DuPont Brasil'den (SP, Brezilya) alınarak üretim sağlanmışlardır. Etilen vinil asetat (EVA) filmleri (Elastomelt 55) Grupo Elasto Adesivos'tan (RS, Brezilya) satın alınmış ve yapıştırıcı olarak kullanılmıştır. Bu yapıştırıcılar, 70mm kalınlığında, 0,075 kg.m-2 alan yoğunluğuna sahip ve EVA reçinesi karışımından yapılmış hotmelt yapıştırıcılardır. Bu yapıştırıcılar kalıplama öncesinde aramid kumaşları bir arada

tutmak amaçlı kullanılmıştır. UHMWPE laminat ve EVA film olduğu gibi kullanılmıştır. Aramid kumaşlar, kalıplamadan önce kalan nemi uzaklaştırmak için 4 saat 105°C'de hava sirkülasyonu olan bir fırına yerleştirilerek nem uzaklaştırılması yapılmıştır. Balistik laminatlar, UHMWPE laminatlarının [0˚/90˚] konfigürasyonunun üst üste yerleşmesi için [0˚/180˚] yönünde yerleştirilmiştir. UHMWPE laminatları, aramid kumaşlar ve EVA filmleri elektrikli makasla kesilmiştir. Katmanlar, 5.30kg.m-2 ± 0.05kg.m-2'lik bir alan yoğunluğuna ulaşmak için elle yerleştirilme işlemi yapılmıştır. Aramid kumaşlar, hibrid kompozitlerin merkezinde, UHMWPE laminatları arasına istiflendirilmiştir. Tablo 5.2, istifleme konfigürasyonunu, UHMWPE laminatların, aramid kumaşların katman sayısını, kompozitlerin alansal yoğunluğunu ve kalınlığını göstermektedir. EVA yapışkan maddeleri kalıplamadan önce aramid kumaşlar arasına yerleştirilmiştir. Örneğin,% 75 UHMWPE ve % 25 aramid kumaş içeren kompozit burada UHMWPE-75/ARA-25 olarak adlandırılmaktadır. Hibrid kompozitlerin alan yoğunluğu, üretici firma tarafından ASTM D-3776 standart test metoduna göre belirlenmiştir.

Tablo 5.2. Deney planı kullanılan konfigürasyonları, her bir bileşenin tabaka sayısı, alan yoğunluğu ve kompozitlerin kalınlıkları (Silva ve ark., 2019).

Örnek adı	Bileşen (Katman sayısı)	Alan yoğunluğu ($kg.m^{-2}$)	Kalınlık (mm)
UHMWPE-100	UHMWPE (48)	5.33±0.05	6.40±0.10
UHMWPE-75/ARA-25	UHMWPE (36)	5.31±0.05	6.12±0.10
UHMWPE-50/ARA-50	Aramid (3) UHMWPE (24)	5.30±0.05	6.00±0.10
UHMWPE-25/ARA-75	Aramid (6) UHMWPE (12)	5.28±0.05	6.26±0.10
ARA-100	Aramid (9) Aramid (12)	5.27±0.05	6.10±0.10

Kompozitler bir FERLEX otoklavında kalıplanmıştır. İşlem üç bölüm halinde gerçekleştirilmiştir. Bu üç bölüm; basınçlandırma, konsolidasyon ve soğutmadır. Otoklav basınçı 6 bar'dan 24 bar'a yükseltilerek hazırlanmıştır. Sıcaklık 80°C'ye yükseltilmiş ve daha sonra 110°C' ye yükseltilmiştir. İşlem 55 dakika sürmüştür. Konsolidasyon, basınç ve sıcaklığın 23 dakika boyunca sırasıyla 24 bar ve 110°C'de tutulmasıyla gerçekleştirilmiştir. Hibrit kompozitler 1500- 1000 mm'lik çelik plakalar kullanılarak birleştirilmiştir. Konsolidasyondan sonra otoklav 30°C' ye soğutuldu ve basınçta düşürülmüştür. Hibrit kompozitler, kontrollü sıcaklık ve neme sahip bir odada saklandı ve daha sonra test için 500*500 mm'lik plakalara kesmişlerdir. Plakalar bir su jeti kesici kullanılarak kesilmiştir. Dinamik sıkıştırma testi, Sure Pulse, osiloskop Pico Scope 5000 Serisi (Pico TechnologyTM) yazılımı ve Vishay Micro Measurements TM' tan sinyal yükseltme sistemi 2300 Sistem ile donatılmış Split Hopkinson basınç çubuğunda (SHPB) (Rel Inc) yapılmıştır. Test örnekleri (Şekil 5.12) 12mm' lik diskler halinde kesilmiştir.



Şekil 5.12. Split-Hopkinson basınç çubuğunda kullanılan test örnekleri: (a) UHMWPE-100; (b) UHMWPE-75 / ARA-25; (c) UHMWPE-50 / ARA-50; (d) UHMWPE-25 / ARA-75 ve (e) ARA-100. (Silva ve ark., 2019)

Her bir numuneden beş eş parça örnek alarak kullanılmış ve aynı deformasyo hızına tabi tutulmuştur. Kullanılan vuruş çubuunun hızı 2053±66.2s^{-1}

deformasyon oranı ile 13,90±0,70 $m.s^{-1}$ dir. Bu yöntemle statik dalgalanma yapısı ve değerleri elde edilmiştir. Buna ek olarak V_{50} limit hız testinede tabi tutularak malzemelerin balistik dayanımları askeri standart MIL-STD-662F'ye göre NIJ 0108.01 standartlarından balistik koruma IIIA seviyesi hedeflenmiştir.

Tablo 5.3' de, vuruş çubuğu hızı, numune kalınlığı, çapı ve bu adım için elde edilen deformasyon hızını (gerinim oranı) ($\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{2Cb}{La}$) göstermektedir. Burada dε gerilim arasındaki fark dt ise geçen zaman, La test örneğinin uzunluğu, Cb mekanik dalgaların yayılma hızıdır. Sonuçlar beş deneyin ortalamalarını temsil etmektedir.

Tablo 5.3. Split Hopkinson basınç vuruş çubuğunun hızı, kalınlığı, test numunelerinin çapı ve gerinim oranı. (Silva ve ark., 2019)

Örneklem	Vuruş çubuğu hızı ($m.s^{-1}$)	Kalınlık (mm)	Çap(mm)	$\frac{d\varepsilon}{dt}(s^{-1})$
UHMWPE-100	14.43±0.55	6.37±0.10	11.80±0.24	2049.24±48.87
UHMWPE-75/ARA-25	14.06±0.49	6.44±0.02	12.22±0.09	2040.34±64.30
UHMWPE-50/ARA-50	13.91±0.81	6.38±0.08	12.31±0.11	2055.56±82.80
UHMWPE-25/ARA-75	13.80±0.84	6.42±0.07	12.04±0.13	2051.60±94.74
ARA-100	13.330.48	6.37±0.06	12.02±0.10	2069.08±57.90

Balistik limit V_{50}, NIJ 0108.01 standartlarına göre balistik koruma IIIA seviyesinde, 5.30±0.05$kg.m^{-2}$' lik kompozitlerin alan başına yoğunluğu ile belirlenmiştir. Alan başına yoğunluk ne kadar yüksek olursa, kalınlık o kadar yüksek olur ve sonuç olarak kinetik enerjiyi emme ve dağıtma kapasitesi o kadar yüksek olacaktır. Referans olarak, NIJ 0108.01 standardın da kullanılan numuneye göre ayrıca 426±15$m.s^{-1}$ ortalama hız değerini göstermektedir. Bu, kısmi

penetrasyonu olan ilk atışlar için bir parametre olarak alınmıştır. Tablo 5.4' te, 9 mm 925 Luger FMJ için elde edilen V_{50} balistik hız limiti sonuçlarını göstermektedir. Her plaka için sonuçlar, beş V_{50} değerlerinin ortalamasını temsil etmektedir. En iyi sonuçlar, kinetik enerjinin daha yüksek emilimi ile UHMWPE-100 kompozitleri için elde edilmiştir.

Tablo 5.4. 9mm 925 Luger FMJ mühimmat için V_{50} balistik limit sonuçları(Silva ve ark., 2019)

Örneklem	Levhalar	Ağırlık (kg)	Kalınlık (mm)	V_{50} limit ($m.s^{-1}$)
UHMWPE-100	1	1.304	6.30	478.50±2.10
	2	1.316	6.30	476.30±2.90
UHMWPE-75/ARA-25	1	1.419	6.10	468.00±2.70
	2	1.419	6.10	473.30±3.30
UHMWPE-50/ARA-50	1	1.490	6.20	459.00±4.70
	2	1.478	6.20	457.00±4.00
UHMWPE-25/ARA-75	1	1.554	6.00	432.80±3.20
	2	1.569	6.00	433.70±3.10
ARA-100	1	1.592	5.90	445.80±4.80
	2	1.574	5.90	438.20±5.40

ARA-100 için, dokuma işleminin bir sonucu olarak aramid kumaşın iç sistemindeki tamponların eksikliği, tamponların kısmen kırılmasına neden olarak bu tür mühimmat için balistik performanslarını olumsuz yönde etkilemiştir. Tablo 5.5' te, 44mm Mag Led SWC mühimmat sonuçlarını göstermektedir. Her plaka için sonuçlar, beş V_{50} değerlerinin ortalamasını temsil etmektedir. ARA-100, kompozitlerin daha yüksek ağırlığı ve 44 Mag Lead SWC mühimmatı sürtünme ile orantılı olarak daha yüksek darbe hızı emilimi nedeniyle en iyi balistik özellikleri sergilediği ve bu da harcanan kinetik enerjinin azalmasının nedeni olarak açıklanmaktadır. Bunun nedeni kumaştakı aşırı bükülmeler ve liflerin esnekliğinin olmasıdır. Kinetik enerjinin yayılma mekanizması bu durumda, aramid kumaşın ikincil liflerinin deformasyonuna ve birincil liflerinin kesme kırılmasının olmaması

ile bağlantılı olabildiğini düşünmüşlerdir. Bu durum 44 Mag Lead SWC mühimmatı için ARA-100 kompozitlerinin daha iyi performansını açıklamaktadır.

Tablo 5.5 44 Mag Lead SWC mühimmat için V_{50} balistik limit sonuçları (Silva ve ark., 2019).

Örneklem	Levhalar	Ağırlık (kg)	Kalınlık (mm)	V_{50} limit ($m.s^{-1}$)
UHMWPE-100	1	1.317	6.30	427.30±5.00
	2	1.317	6.30	447.50±15.70
UHMWPE-75/ARA-25	1	1.422	6.10	427.00±4.20
	2	1.408	6.10	439.00±13.40
UHMWPE-50/ARA-50	1	1.481	6.10	432.80±14.40
	2	1.488	6.10	457.50±30.40
UHMWPE-25/ARA-75	1	1.537	6.00	432.30±5.90
	2	1.540	6.00	431.80±5.90
ARA-100	1	1.566	6.00	461.30±5.90
	2	1.569	6.00	447.00±2.40

V_{50} balistik limitindeki farklılıklar olsa bile, UHMWPE-50 / ARA-50 dışındaki tüm kompozitler, NIJ 0108.01 tarafından balistik koruma seviyesi IIIA için verilen kriterleri karşılamıştır. Bu çalışmadaki kompozitler, 925 Luger FMJ'nin 725.9J kinetik enerjisi ve 44 Mag Lead SWC'nin kinetik enerjisi 1406J' dedir. 44 MagLead SWC'nin kinetik enerjisi, 9mm Luger FMJ'nin kinetik enerjisinin kabaca iki katıdır. Sonuç olarak, UHMWPE-75 / ARA-25, araç zırhları için kompozitler üretmek için en uygun konfigürasyon olarak ön görülmüştür. Sebebi olarak ise iki mühimmat için de başarılı sonuçlar vermesi olmuştur. UHMWPE-75 / ARA-25 44 Mag Lead SWC hemde 9mm Luger FMJ mühimmatı testlerini geçmiştir.

Cao ve ark. 2020'de yapmış oldukları Mükemmel balistik performansa sahip CNT / PSt-EA / Kevlar® kompozit çalışmalarında; karbon nanotup polistiren etil akrilat (CNT / PSt-EA) bazlı kesme kıvamlaştırıcı sıvıyı (C-STF) Kevlar® kumaşı ile birleştirilerek hazırlanan yeni bir tür balistik kompozit rapor etmişlerdir. PSt-EA tabanlı STF'nin reolojik özelliği CNT tarafından önemli ölçüde arttırılğından, C-

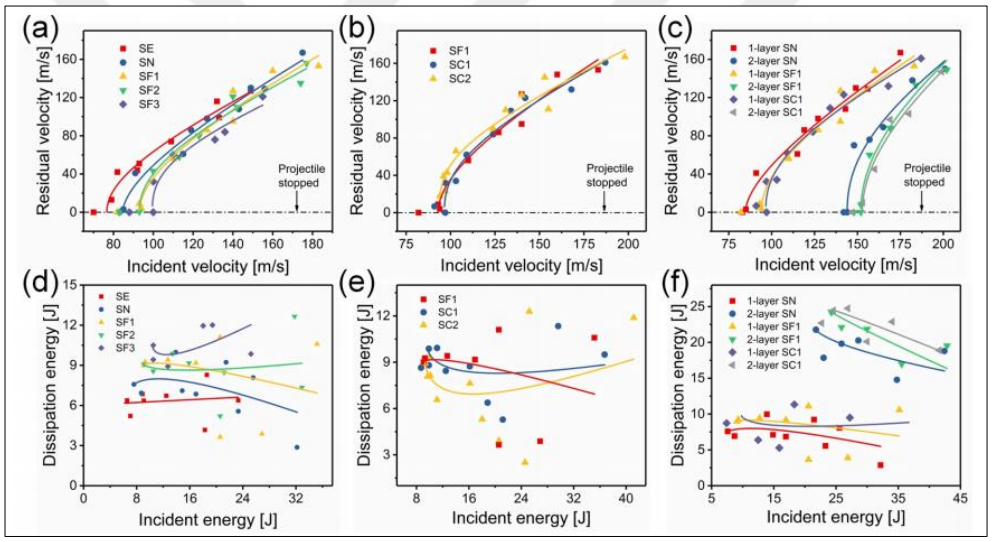
STF / Kevlar®, Kevlar® kumaşından daha iyi balistik özellik sunmaktadır. Balistik testler Kevlar®'ın balistik limit hızının (V_{bl}) C-STF emprenye edilerek 84.6 m /s' den 96.5 m /s' ye yükseltilebileceğini göstermiştir. Burada, C-STF / Kevlar® için optimum CNT ilavesi %1.0' dir ve aşırı CNT ilavesi takviye etkisini azalttığını raporlamışlardır. Ayrıca, STF içindeki dağılmış fazın hacim oranı %53.5' ten %58.5' e yükseldikçe, V_{bl} 92.9 m / s'den 99.5 m / s'ye yükselmiştir. Balistik etkinin sonlu elemanlar analizi (FEA) sonuçlarını yarı statik delinme ve iplik çekme sonuçları ile birleştirerek, gelişmiş anti-darbe mekanizması elde edilmiştir. İplikler arasındaki sürtünme katsayısının güçlendiği ve kumaşın dayanma alanının STF'lerin katkısı ile arttırıldığı, böylece Kevlar®'ın balistik performansının çok iyi derecede iyileştirildiği bulunmuştur. STF ve kompozit ürünlerin hazırlanmasında kayganlaştırıcı içermeyen emülsiyon polimerizasyonu ile hazırlanmış olan PSt-EA nano parçacıkları dispersiyon fazı olarak alınmıştır. CNT ilk önce etil alkol ve aseton ile oluşan bir çözücü içinde homojen olarak dağıtılmıştır. Daha sonrasında etilen glikole (EG) dağıtılmıştır. Etil alkol ve aseton çıkarıldıktan sonra CNT/EG karışımı elde edilmiş olup STF ler PSt-EA nano partiküllerinin EG veya CNT/EG karışımlarına dağıtılması ile üretilmişlerdir. PSt-E hacim fraksiyonu ve CNT ağırlık fraksiyonunun etkisini incelemek için beş tip STF ve C-STf hazırlamışlardır. Çalışmada kullanılan kumaş 200g/m^2 yogunluga sahip bez ayağı dokuma konstüksiyonunda aramid yapılı Kevlar® marka kumaştır. Bu kumaşlardan kompozit malzeme ede etmek için STF numuneleri önce 1:2 su ile seyreltmişlerdir. Daha sonra çözeltinin homojenleşmesini sağlamak için 30 dk ultrasonikleştirme yöntemi ile karıştırılmışlardır. Kevlar® kumaşlar yaklaşık olarak 11.3*11.3cm olacak şekilde kesilmiştir ve çözeltiyi ayrı ayrı 5 er dakika emdirilmesini sağlamışlardır. Empende edildikten sonra kumaş suyunun buharlaştırılması için 55°C de 10 dakika boyunca kurutma işlemi gerçekleştirmişlerdir. Basit ve anlaşılır olması için numunlerin tanımı ve spesifik parametreleri Tablo 5.6 da gösterilmiştir.

Tablo 5.6. STF / Kevlar® ve C-STF / Kevlar® kompozitlerinin tanımı ve ayrıntılı verileri.(Cao ve ark., 2020)

Numune	Emdirilmiş STF			Ortalama ağırlık		Ağırlık artışı (%)
	PSt-EA (hacim %)	EG (Hacim %)	CNT (ağırlık %)	Emdirmeden önce	Emdirmeden sonra	
SN	0	0	0			0
SF1	53.5	46.5	0	2.460	2.968	21.1
SF2	56.0	44.0	0	2.456	2.890	18.3
SF3	58.5	41.5	0	2.479	2.915	18.3
SC1	53.5	46.5	1.0	2.466	2.958	20.7
SC2	53.5	46.5	1.5	2.466	3.023	23.3
SE	0	100	0	2.443	2.695	11.1

Yüksek hacimli STF'nin emprenye edilmesiyle Kevlar®'ın balistik direnç performansının büyük ölçüde arttırılabileceği sonucuna varılmıştır. CNT' nin C-STF/ Kevlar®'da balistik direnç özelliği üzerindeki etkisi Şekil 5.13 b ve e de gösterilmiştir. SF1 SC1 ile karşılaştırılacak olunduğunda V_{bl} (balistik hız limiti) 92,9 m/s' den 96 m/s' ye yükseldiği görülmüştür. CNT ilavesi, STF / Kevlar®' ın balistik direnç özelliğini etkili bir şekilde artırdığını raporlamışlardır. Bununla birlikte, CNT'nin ağırlık fraksiyonu %1.5' a yükseldiğinde, SC2 V_{bl} (balistik hız limiti) değeri hala SF1'den daha yüksek olmasına rağmen, SC1' inkinden önemli ölçüde daha düşüktür. Ayrıca, SC2 en kötü enerji dağılımı sonucu verdiğini raporlamışlardır. CNT konsantrasyonu yüksek olduğunda, Kevlar®'daki fazla parçacıklar CNT tarafından toplanır ve aşırı STF'nin kumaş yüzeyine yapışmasına neden olmaktadır. Bu dengesizlik ise Kevlar®' ın yüksek hız etkisi altında koruyucu özelliğini düşürmektedir. Buda belirli bir aralıkta CNT eklemenin, kompozitin balistik performansını iyileştirdiğini gösterirken, ancak CNT miktarı belirli bir değeri aştığında, balistik iyileşmenin zayıfladığını göstermektedir. Pratik uygulamalarda, çok katmanlı Kevlar® yüksek koruma gereksinimlerini

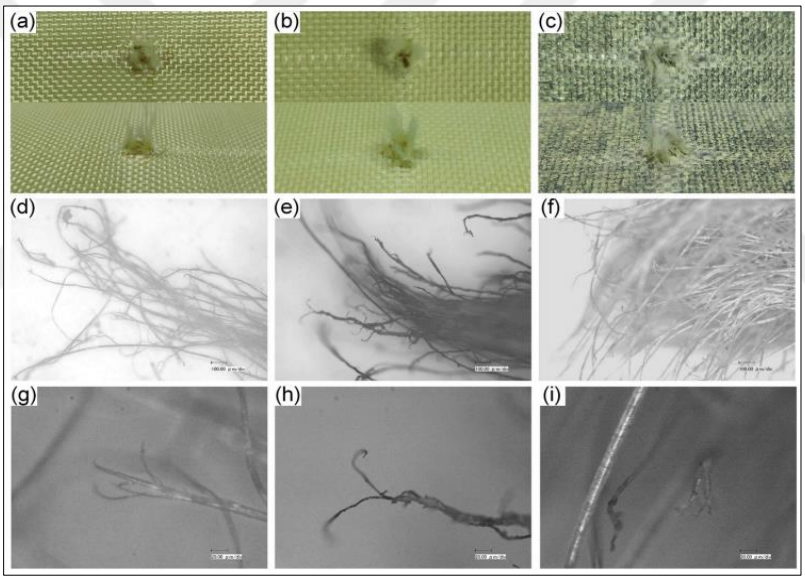
karşılayabilirken, araştırmada iki kumaş tabakası kurşun geçirmezlik açısından test edilmiştir. Şekil 5.13 c'deki artık hız sonuçlarından, iki tabakalı kumaşın V_{bl}'si, tek tabakalıdan neredeyse 1.6 kat daha büyüktür. İki katmanlı STF / Kevlar®'ın balistik direnç özelliği yalın haldeki Kevlar®' dan daha iyi olduğunu raporlanmıştır. %1.0 kütle fraksiyonu CNT eklenmesi ile C-STF / Kevlar® iki katmanlı STF / Kevlar®'ın koruyucu özelliğini de artırabileceği raporlamışlardır. Şekil 5.13f' de iki tabakalı ve tek tabakalı numunelerin enerji dağılımını göstermektedir. İki katmanlı kumaş, katmanlar arası sürtünme nedeniyle tek katmanlı yalın kumaştan daha fazla enerji absorbe ettiğini gösterilmiştir.



Şekil 5.13 (a) STF'nin farklı hacim fraksiyonu, (b) farklı CNT konsantrasyonları ve (c) farklı katmanlar altında kalan hız sonuçları, olay hızlarını değiştirir. Semboller deneysel sonuçlardır ve düz çizgiler Recht-Ipson bağlantı sonuçlarıdır. (d), (e) ve (f), karşılık gelen enerji yayılım sonuçlarıdır. Kesintisiz çizgiler Recht-Ipson fitingiyle elde edilen artık hızlardan hesaplanır. (Cao ve ark., 2020)

Balistik darbe sırasında kumaş ipliklerinin hata modunu incelemek için Kevlar®, STF/Kevlar ve C-STF/Kevlar kumaşlarının mikroskopik ve makroskopik yapıları incelenmiştir. Şekil 5.14 a'dan c'ye kadar benzer bir bozulma yapısı

göstermektedir, Kırık iplikler açık bir şekilde gerilmiştir ve kırılma alanındaki iplik uçlarının uzunluklarıda farklıdır. SC2'nin darbe bölgesine yakın yüzeyindeki C-STF kaplamaları darbe nedeniyle parçalanmıştır. Balistik etki sırasında, lifler iki tür arıza (gerilme hatası ve kesme hatası) moduna maruz kalabilmektedir. Lifin başarısızlık modu birçok faktör tarafından etkilenmektedir. Tipik olarak, gerilme başarısızlığı lifin kırılma yüzeyi düzensizliğinden ve kesme başarısızlığı ise lifin gergin olmasından etkilenmektedir. Lifler çekme başarısızlığı modunda daha fazla enerji yayabilirler (Chen ve ark., 2013). Şekil 5.14 d'den i' ye kadar SN, SF2 ve SC2'nin kırık ipliklerinin mikroskopik görünümlerini göstermektedir.



Şekil 5.14. Üst ve yan görünüm altında (a) SN, (b) SF2 ve (c) SC2'nin makroskopik görünümü. (d), (e) ve (f), (a), (b) ve (c) 'ye karşılık gelen kırılmış ipliklerin mikroskopik görünümleri. Ayrıca, (g), (h)' ye (i), (d)'ye, (e) ve (f) 'ye karşılık gelen büyütülmüş detaylardır. (Cao ve ark. 2020)

STF'nin partikül hacmi fraksiyonunun arttırılmasının STF / Kevlar®' ın balistik performansını artırabildiğini raporlanmıştır. CNT ilavesi optimal bir değere sahiptir ve C-STF/Kevlar' ın CNT ile %1 kütle fraksiyonu ile koruyucu etkisi %1.5'

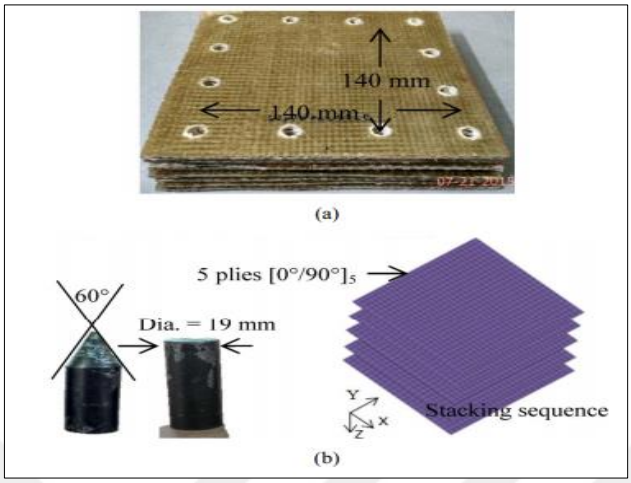
tan bile iyidir ve yarı statik fonksiyondaki delinme kuvveti, balistik test sonucuyla kabaca aynıdır. STF' lerin artan sürtünme katsayısının balistik limit hızı ve harcanan enerji üzerindeki etkisi nicel olarak analiz edilmiştir. STF'lerin, iplikler arasındaki sürtünme katsayısını arttırdığını, kumaşın bulunduğu bölgede alanını arttırdığını, stres dağılımını daha homojen hale getirdiğini ve böylece Kevlar®' ın balistik performansını geliştirdiğini göstermiş olduğunu raporlamışlardır.

Ansari ve ark. (2017) GFRP ve Kevlar®/epoksi sandviç kompozit plakanın darbe davranışı: Deneysel ve FE analizleri çalımasında; 5 kat cam kumaş istiflenerek imal edilmiş kompozit laminatlar ve el yerleştirme yöntemi kullanılarak 0°/90° pozisyonunda epoksi ile emprenye edilmiş, Kevlar® kumaşı istiflenerek merminin 200-300 $m.s^{-1}$ darbe hızına maruz bırakılmıştır. Deneysel ve sonlu elemanlar (FE) analizlerine dayanarak, kompozit laminatların balistik darbe direncini etkileyen merminin burun şeklini raporlamışlardır. Balistik amaçlı koruma limiti, laminatın kalınlığı arttıkça artmıştır. Balistik darbe sırasında kompozit liflerdeki çekme başarısızlığından kaynaklanan delaminasyon birincil başarısızlık olarak kaydedilmiştir. Laminasyonun ön yüzünde delaminasyon ve lif kırılması, arka yüzde kesme başarısızlığı ortaya konulmuştur. Test edilen cam/Kevlar/epoksi hibrit kumaş kompozit ve yalın haldeki cam/epoksi veya Kevlar®/epoksi gibi tüm laminat kombinasyonlarından, aralarında sandviçlenmiş cam kumaşlı Kevlar/epoksi laminat en iyi penetrasyon direncini sunduğu raporlanmıştır. Hataların ise Balistik etki altındaki lamine kompozit plakadaki farklı arıza modlarından, delaminasyon ise gerilimdeki matris arızasından kaynaklanan önemli bir arıza modu olarak ortaya koyuşlardır. Laminatın arka yüzündeki laminada gerilme başarısızlığı nedeniyle lif kırılması, darbe noktasının yakınında meydana geldiği raporlanmıştır. Laminatın ön yüzündeki kesme başarısızlığı, künt mermi ile balistik etki altında oluştuğu belirtilmiştir. Bazı delaminasyon parçaları, kompozit plakanın arka yüzünde bulunan düzlemsel kesme başarısızlığından kaynaklanmaktadır. Bu araştırmalarda kullanılan malzeme ve deneysel test, methot yöntemleri; laminatların özellikleri Tablo 5.7 de verilmiştir.

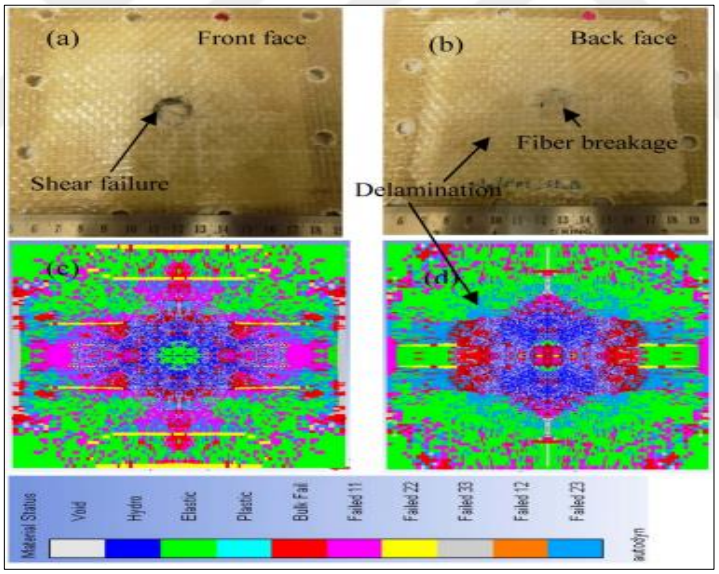
Laminantların oluşum aşaması Şekil 5.15 da verilmiştir. Şekil 5.16(a)' da laminatlara uygulanan 220 m/s insidans hızında kör mermi darbesi ile lamine kompozit plakadaki hasar mekanizması oluşumu ve Laminantın kayma hatası plakanın ön yüzünde ve gerilme başarısızlığına bağlı lif kopması, darbe noktasının altında ve kompozit plakanın arka yüzünde gözlenmiştir. Balistik çarpma altında kompozit plakadaki hasarın çoğu, delaminasyon veya matris yüzeyinden kaynaklı kompozit plakanın ön ve arka yüzünde meydana gelmiştir.

Tablo 5.7. GFRP'nin malzeme özellikleri (Ansari ve Chakrabarti, 2017)

Durum denklemi: ortarombik	**Çekme hatası gerilimi 22 (kPa):** 4.318e+005
Halin alt denklemi: Polinom	**Maksimum kesme gerilimi 23 (kPa):** 8.0e+004
Referans yoğunluğu (gm / cm3) 1800	**Çekme dayanımı zorlanması 11:** 0.01
Young modülü 11 (kPa) 6.000e+006	**Çekme dayanımı zorlanması 22:** 0.02
Young modülü 22 (kPa) 1.971e+007	**Çekme dayanımı zorlanması 33:** 0.02
Young modülü 33 (kPa) 1.971e+007	**Kesme modülü (kPa):** 1.790e+006
Poisson oranı 12: 0.150	**Hata sonrası yapı:** Ortarombik
Poisson oranı 23: 0.130	**Güçlendirme:** Elastik
Poisson oranı 31: 0.492	**Artık kesme sertliği. frac.:** 0.20



Şekil 5.15. Mermi örneği ve GFRP (cam elyaf takviyeli plastik) kompozit hedef plakası (Ansari ve Chakrabarti, 2017)



Şekil 5.16. Kör merminin etkisiyle lamine GFRP kompozit plakadaki hasar paterni: (a) - (b) Deneysel; (c) - (d) sayısal. (Ansari ve Chakrabarti, 2017)

Lamine kompozit hedef plakanın mermiye sunduğu penetrasyon direnci daha çok balistik darbe hızına yakın insidans hızındadır. Kompozit hedef plakanın balistik performansının, mermi burun şekillerinden etkilendiği, hedefin balistik

sınırı hedef kalınlığı ile doğru orantılı olarak arttığı araştırma sonucunda raporlanmıştır. Balistik etki altındaki lamine kompozit plakadaki farklı arıza modlarından delaminasyonun, gerilimdeki matris arızasından kaynaklanan önemli bir arıza modu olduğu sonucuna varılmıştır. Laminatın arka yüzeyindeki laminada gerilme hatası nedeniyle, darbe noktasının yakınında lif kırılması meydana gelmiştir. GFRP ve Kevlar®/epoksi laminattan yapılmış sandviç kompozit plakaların analizinden elde edilen sonuçlar ile yalın haldeki Kevlar®/epoksi kompozit plaka tarafından sağlanan balistik koruma karşılaştırmasında GFRP/kevlar/epoksi sandviç kompozitin daha iyi penetrasyon direnci sunmuş olduğu sonuçlarına ulaşmışlardır.

Jabbar ve ark. (2019) Silika nanopartiküllerinin Kevlar®/epoksi hibrit kompozitlerin mekanik özellikleri üzerine etkisi çalışmalarında; Kevlar®/epoksi kompozitlerine eklenen silis nanofillerin etkisini incelenmişlerdir. Üretilen hibrit laminant kompozitlerin eğilme özellikleri, çekme özellikleri ve darbe enerjisinin absorbe edilmesi açısından test edilmiştir. Yüksek sıcaklıklarda kompozit özellikleri araştırmak için DMA analizleri yapmışlardır. Silika nanofillerin eklenmesi kompozitlerde eğilme özelliklerini, çekme mukavemetini ve enerji depolama modülünü arttırdığı gözlenmiştir. Darbe enerjisi emilimi, belirli bir nanofiller ilavesine kadar artmıştır. Bu çalışmanın bulguları, Kevlar® kumaşlarına silika nanofillerinin eklenmesi ile hibrid laminat kompozitlerin mekanik özelliklerini arttırmak için umut verici bir yöntem olduğunu göstereceği kanısına ulaşmışlardır. Çalışmada kullanılan malzeme ve methotlar olarak ise Araldite® LY 5052/Aradur® 5052 soğuk kür epoksi sistemi 60:40(epoksi:hızlandırıcı) karışım oranına sahip bir matris malzemesi olarak kullanılmıştır. Bu reçine sistemi için jelleşme süresi oda sıcaklığında 5-6.5 saat olarak kullanılmıştır, takviyeyi kolayca emprenye edebilen düşük viskoziteli bir epoksi reçinesidir ve nanofillerin reçineye doğrudan dağıtılması için uygun olduğundan seçilmiştir. Takviye, 3330dtex doğrusal yoğunluğa ve 1333 sayı filamana sahip Kevlar® 963(Dupont) üretiminden sağlanmıştır. Aramid lifin özellikleri Tablo 5.8' de verilmektedir.

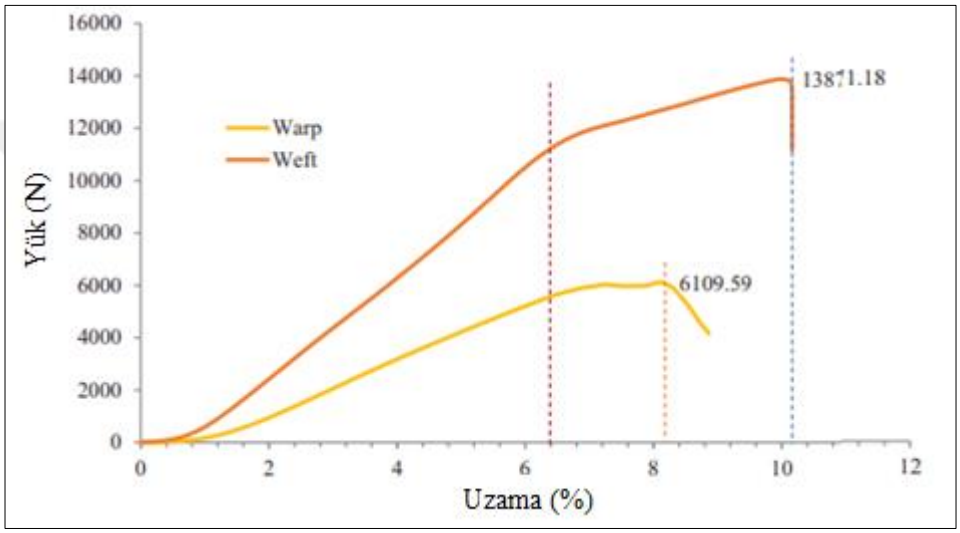
Dolgu maddesi olarak US Research Nanomaterials, Inc.' den elde edilen silika nanoparçacıkları kullanılmıştır ve çapları 20-30nm arasındadır. Parçacıkların kütle yoğunluğu <0.10 g /cm^3 ve beyaz renkte oldukları belitrilmiştir.

Tablo 5.8 Kullanılan aramid liflerinin özellikleri (Jabbar ve ark. 2019).

Young modülü (GPa)	Gerilme dayanımı (cN/Tex)	Nihai uzama (%)	Yoğunluk (g/cm3)
124	7810	2.4	1.44

Kumaş, geleneksel bir mekik tezgahında Kevlar® ipliği kullanılarak 1/1 bezayağı konstrüksiyonunda dokunmuştur. Kumaş, çözgü ve atkı boyunca sırasıyla 12 ve 20 iplik/inç iplik yoğunluğuna sahiptir. Çözgü ve atkı boyunca kıvrımın her biri %0.90 iken elde edilen kumaş kalınlığı 0.72mm olmuştur. Kompozitlerin yapımında elle yatırma yöntemi ve el yatırma yönteminin ardından vakum torbalama yöntemi kullanılarak kompozit malzemeler üretilmiştir. Kompozitler üretildikleri sistemle beraber 24 saat oda sıcaklığında dinlendirilip sonrasında 4 saat boyunca 100˚C de kürlenmesini sağlamışlardır. Dört katlı hibrit kompozite takviye olarak hem Kevlar® kumaşı hem de silika nanoparçacıkları kullanılarak üretimi sağlamışlardır. Hibrit kompozit plakalar, %4, 8, 12 ve %16 nanopartiküller (kullanılan reçine hacminin % 'si) ilave edilerek üretmişlerdir. Bu kompozitler sırasıyla S4, S8, S12 ve S16 olarak etiketlenmiştir. Referans numunesi ise herhangi bir nanoparçaçık eklenmemiş halde S0 olarak etiket adıyla adlandırmışlardır. Hibrit kompozitlerin üretimi için, silika nanoparçacıkları ilk önce mekanik bir karıştırıcı kullanılarak 1200 rpm karıştırma hızında dört saat süreyle reçine içinde dağıtılmış ve tüm numunelerin lif hacim fraksiyonu (Vf) %50' de tutuluştur. Numune örnekleri kesilerek Üniversal Test Makinesi (UTM Z100, Zwick-Almanya), standart ASTM D3039 ve ASTM D7264 test yöntemine göre kompozitlerin gerilme ve eğilme özelliklerini incelemek için kullanmışlardır. Sarkaç darbe test cihazı (HIT 50 P, ZwickGermany), ISO 179'a göre kompozit numunelerin darbe

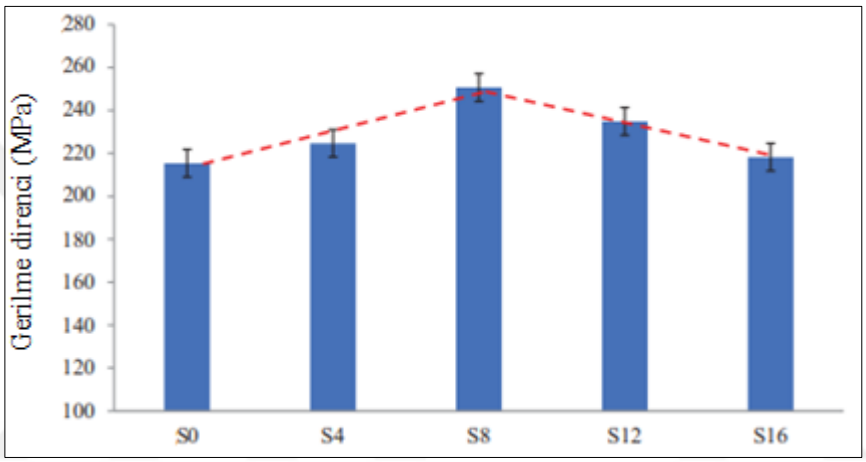
mukavemetinin ölçülmesinde kullanıldı ve dinamik mekanik özellikleri Dinamik Mekanik Analiz Cihazı (Q800, TA instrument-USA) kullanılarak araştırılmıştır. Takviye ve kompozitlerin gerilme özelliklerini araştırmışlardır ve çözgü-atkı yönü boyunca test edilen Kevlar® dokuma kumaşın yük altında uzama eğrileri Şekil 5.17'de gösterilmektedir.



Şekil 5.17. Kevlar® kumaşının yük uzama eğrileri (Jabbar ve ark. 2019).

Sonuçlardan, çözgü yönündeki maksimum gerilme geriniminin, atkı yönüyle karşılaştırıldığında çok küçük olduğu bulunmuştur. Bu etki, her iki yöndeki iplik yoğunluğu ile doğrudan ilişkilidir. Çözgü boyunca sadece 12 iplik/inç, atkı boyunca 20 iplik/inç olduğu raporlanmıştır. Sonuçlar atkı yönündeki daha yüksek iplik sayısının daha fazla yük taşıdığını göstermektedir. İpliklerin 20'den 12'ye düşürülmesinin de gerilme mukavemetinde %55' lik bir azalmaya neden olduğunu sonuçlarla da desteklemişlerdir. Böylece, (iplik sayısı) / (birim uzunluğu) dokuma kumaşın mukavemetine doğrudan katkıda bulungugunu ortaya koymuşlardır. Elastik deformasyon aralığında, kumaşın sergilediği uzama, hem çözgü hem de atkı boyunca yaklaşık %6.5' tir. Sonraki plastik deformasyon

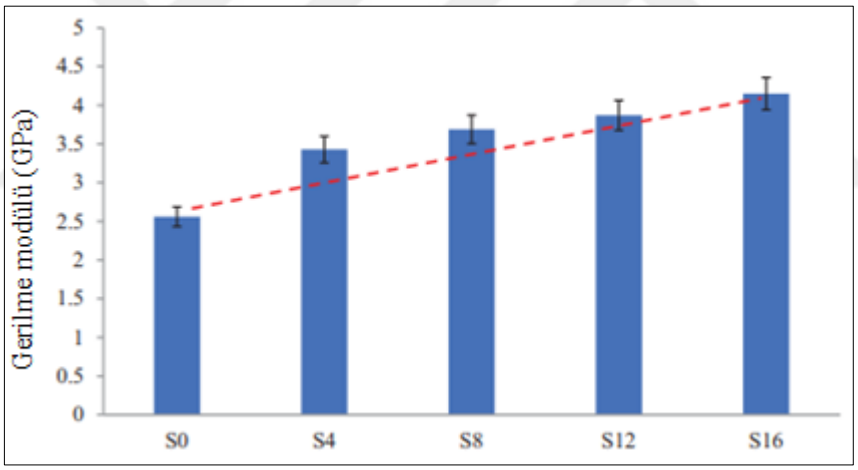
bölgesi, yükte ani bir düşüşten önce atkı boyunca daha fazla deformasyon göstermiştir. Yükteki bu ani düşüş, daha fazla sayıda ipliğin eşzamanlı başarısızlığına bağlanmış ve bu nedenle, atkı yönünde gözlenen kopma uzaması, çözgü yönünde olan kopma uzamasından daha büyük değerdedir. Farklı bir silika nanoparçacık fraksiyonu kullanılarak hazırlanan hibrid kompozit numunelerin gerilme özellikleri de araştırılmış ve sonuçlar Şekil 5.18' de verilmiştir.



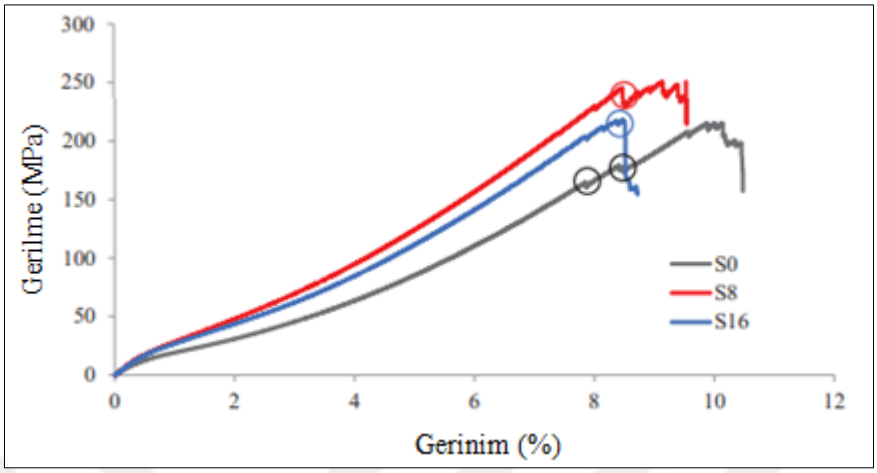
Şekil 5.18. Dolgu% 'sinin bir fonksiyonu olarak çekme gerilmesindeki değişim (Jabbar ve ark. 2019)

Başlangıçta, silika nanoparçacıklarının ilavesiyle kompozitin çekme mukavemetinde %8' e kadar bir artış vardır. Konsantrasyonun bu noktanın ötesine yükseltilmesi, %12 ve %16 silika nanoparçacıklarına sahip hibrid kompozitlerinde olduğu gibi, kompozitin çekme mukavemetinin azalmasına neden olmuştur. %8 konsantrasyona kadar, matris ve kompozitte silika nanoparçacıklarının muntazam bir dispersiyonu ve dağılımı olduğu sonucuna varmışlardır. Matris, dolgu maddesi arasında düzgün bir yük dağılımına yol açar, böylece laminatın elastik özelliklerini geliştirmiş olduğu raporlanmıştır. Nanoparçacıkların %12 ve üzerindeki konsantrasyonlarda topaklanmaya neden olup gerilme özelliklerinin bozulmasına neden olmaktadır. Silika nanoparçacıklarının eklenmesi, Şekil 5.19'da gösterildiği gibi kompozitin gerilme modülünde bir artışa neden olmuştur. Gerilme modülü,

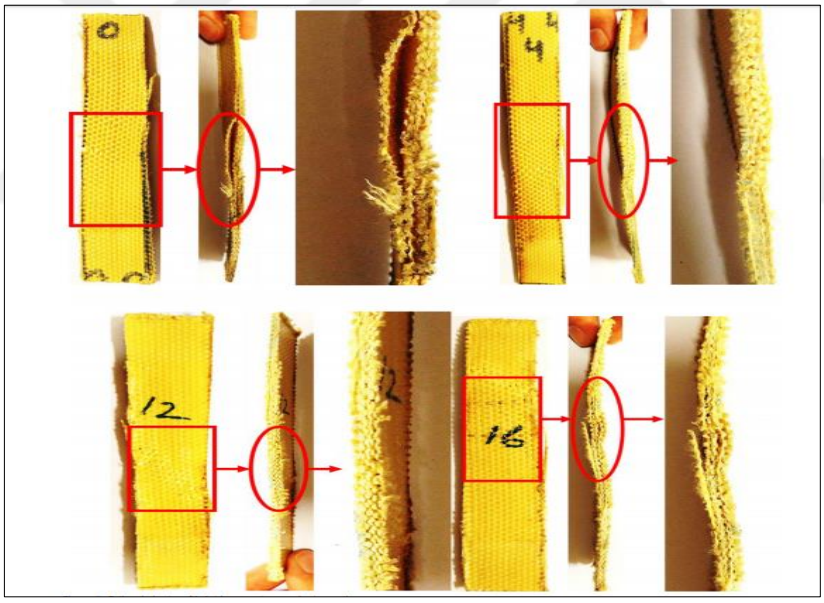
bileşenlerin nispi fraksiyonuna bağlı olarak malzemenin dayanım özelliğini göstermektedir. Hibrit kompozitler, silika parçacıklarının artan bir fraksiyonuna sahiptir ve silika nanopartikülleri daha sert olduğundan, modülde bir artışın olduğuna ulaşmışlardır. Gerilme mukavemetindeki artış ve sonrasındaki azalma, gerilme-gerinim eğrilerinde gözlenen kırılma tokluğu davranışı ve gerilme testinden sonra gözlenen kompozit örneklerin görüntüleri ile de bu durumu desteklemişlerdir (sırasıyla Şekil 5.20 ve 5.21). S0 örneğinin gerilim-gerinim eğrisi, 165 ve 176 MPa' daki eğride sapmayı göstermiştir, S0 kompozit örneğindeki çatlak başlangıcını ve sonrasında strese bağlı çatlaktaki artışla, maksimum stresde keskin bir sapma oluşumu ve muhtemelen belirli liflerin kırılma hatasını temsil eden daha küçük pikler görülmüştür.



Şekil 5.19. Dolgu (silika) %' sindeki artış ile gerilme modülündeki artış (Jabbar ve ark. 2019).

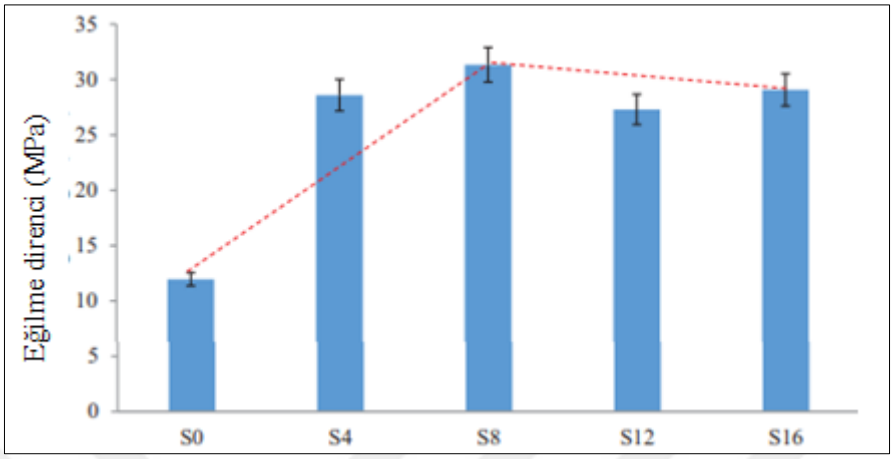


Şekil 5.20. Çekme testi sırasında kompozit numunelerin gerilme-gerinim değiştirme eğrileri (Jabbar ve ark. 2019).

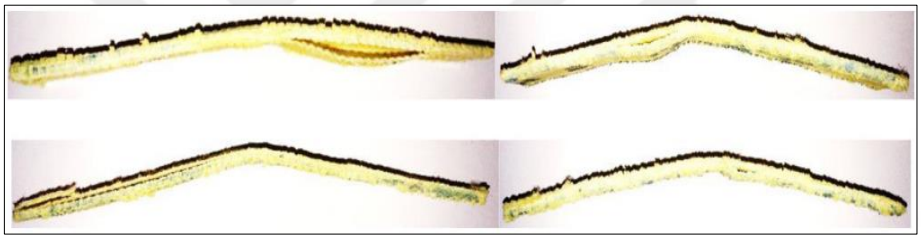


Şekil 5.21. Çekme testinde hibrit kompozit numunelerin hata davranışı (Jabbar ve ark. 2019)

%8 silika nanoparçacıklarının eklenmesi, önceki hipotezlerine göre matris mukavemetini arttırmıştır ve gerilim-gerinim eğriside bu hipotezi doğrulanmıştır. Matris çatlamasına bağlı başlangıç sapması, S0 ile karşılaştırıldığında oldukça yüksek olan 242 MPa' da gözlenmiştir. Ancak S16 durumunda, tepe noktasındaki sapma neredeyse maksimum uzamadadır, bunu tam başarısızlığı gösteren kuvvette keskin bir düşüş izlemektedir. Bu, %16 silika parçacıklarının eklenmesinin malzemenin kırılgan bir davranış göstermesine neden olduğunu göstermiştir. Çekme yükünün uygulanmasına bağlı olarak kumaş katlarının delaminasyonu Şekil 5.21'de gösterildiği gibi kontrol S0 numunesinde net bir şekilde ortaya konulmuştur. Lifler ve matris arasındaki arayüzey yapışmasının düşük olduğunu ve kompozit malzemenin kolayca delamine edildiğini gösterdiği raporlamışlardır. Nanofiller ilave edilerek, test edilen örnekler hiçbir delaminasyon göstermediği için delaminasyon direncini arttırdıklarını ortaya koymuşlardır. Ancak %4 ve %8 de bu başarı elde edilirken %12 ve %16 nanofiller içeren kompozitler nanofiller ve reçine arasında uygun bir arayüzey yapışması elde edilmemiş olup bölgesel olarak nano-kompozit özelliklerini bozmuştur. Bu durum kompozit numunenin interlaminal başarısızlığına neden olmuş ve daha düşük bir gerilme mukavemeti değeri göstermesine sebep olduğu raporlanmıştır. Şekil 5.22' de, % olarak 0, 4, 8, 12 ve 16 silika nano parçacıklarına sahip lamine kompozit yapılar için eğilme mukavemetindeki değişimi göstermektedir. Sonuçlar, silika nano parçacıklarının eklenmesi, kompozit numunelerin bükülme mukavemetini önemli ölçüde arttırdığını göstermektedir. Dolgu (silika) %' sindeki artışla mukavemet artmaktadır. Nanofillerin dahil edilmesi, bükülme mukavemetinin artmasına katkıda bulunan arayüzey yapışmasının arttırılmasına yardımcı olmuştur. Arayüzey yapışmasındaki bu artış, bükülme testinde numunelerdeki değişme Şekil 5.23' de gösterilmiştir.



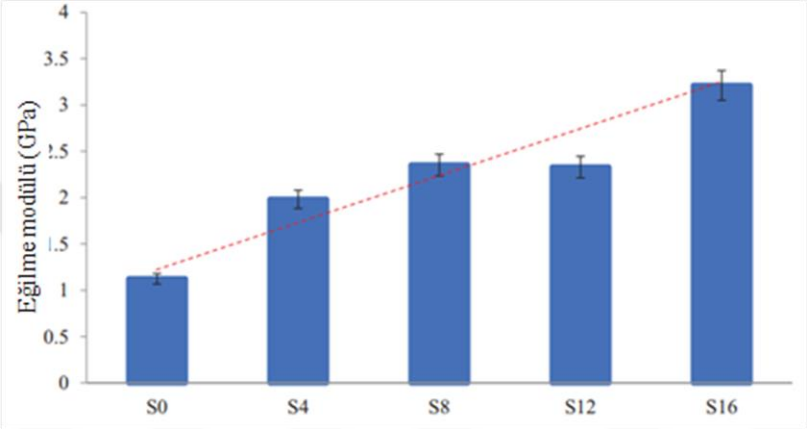
Şekil 5.22. Dolgu yükleme hızının bir fonksiyonu olarak çizilen eğilme mukavemeti (Jabbar ve ark. 2019).



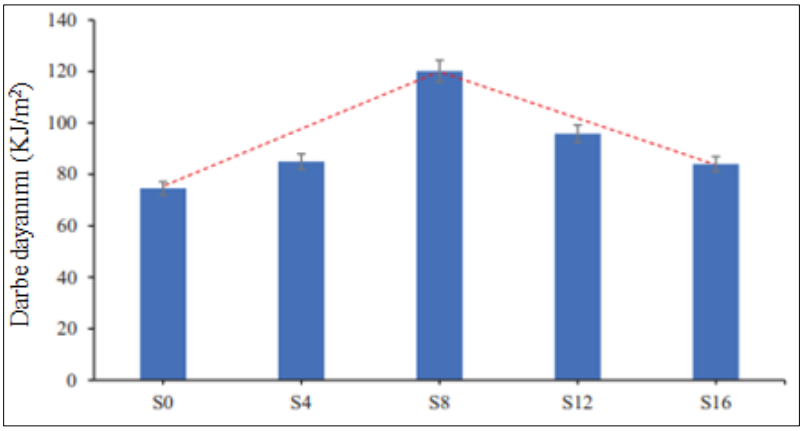
Şekil 5.23 Bükme testinden sonra delaminasyon gösteren kompozit numuneler (Jabbar ve ark. 2019).

Bükülme modülünde %8 ve %12 lik silika içeren kompozitlere yükleme hızında büyük bir kayma olmamasına rağmen, dolgu maddelerinin eklenmesi hibrid kompozit malzemelerin bükülme modülünü de artırıcı yönde etkilemiştir. Silikanın eklenmesi artan sertlik ve daha yüksek bükülme modülü ile sonuçlanmıştır. Bu, matristeki dolgu maddelerinin dispersiyonu ve arayüzey yapışmasının bakımından açıklanmıştır (Şekil 5.24). Gerilme ve bükülme mukavemetinin, arayüzey yapışmasından güçlü bir şekilde etkilendiği sonucuna varılırken, modül ise bileşenlerin sertliğinden (sert parçacıkların dahil edilmesinden dolayı) daha fazla etkilenmiştir. Bu testelere ek olarak Charpy darbe testi kullanılarak darbe hızı 3,4m/s sabit yükleme hızında sabitlendi ve kullanılan çekiç kütlesi 7,5 kg ve düşme açısı 147,96 olarak ayarlanmıştır. Bu ayar sonucunda

Nanofillerle yüklü kompozit malzemenin%8' e kadarki nanofilli kompozitlerde yüksek enerji absorbe etme kapasitesini gösteren parçacık yüklemesinde artış ve darbe dayanımında artış olmuştur (Şekil 5.25). Silika nanofilinin bu miktarın üzerine çıkarılması, darbe mukavemeti değerlerinin azalmasına neden olmuştur (% 12 ve 16 silika yüklemeleri için).



Şekil 5.24. Dolgu yükü ile bükülme modülü % değişimi (Jabbar ve ark. 2019).



Şekil 5.25. Dolgu yüküne karşı darbe dayanımı (Jabbar ve ark. 2019).

Bu çalışmada sonuç olarak kompozitlerin gerilme mukavemeti, %8 silika içerikli parçacık yüklemesine kadar nanofil ilavesiyle artış göstermiştir. %8 den

fazla Nanofil(silika) ilave edilmesi, gerilme mukavemetini azalttı, ancak nanofillerin ilavesiyle gerilme modülü arttırılmıştır. Benzer bir davranış, eğilme mukavemeti ve modül sonuçlarnda da gözlenmiştir. Kompozitlerin darbe mukavemeti, %8 oranına kadar Silika nanoparçacıklarının eklenmesiyle arttırılmıştır. Nanofillerin daha fazla ilave edilmesi, darbe enerjisi emilimini azaltmıştır. Ayrıca, nanofillerin eklenmesi, sert dolgu malzemesinin varlığı nedeniyle süneklikten kırılganlığa geçişine kadar malzemeyi olumsuz olarak etkilemiştir. Nanofiller içermeyen kompozitin, balistik kullanıma yönelik malzemeler için arzu edilen bir özellik olan DMA analizi sonucuna göre daha viskoelastik tepki gösterdiği ortaya koymuşlardır. Gerilme mukavemeti ve darbe enerjisinin yutulması nanofiller yükleme oranı için belirli bir dereceye (%8) kadar artmasına rağmen, malzemenin mekanik performansındaki iyileşmenin etkisi ümit verici olduğu bildirilmiştir.

Tezin bu bölümünde verilen bilgiler sonucunda yapılan değerlendirmeler burada verilmiştir. Balistik koruma amaçlı kullanılan tekstil malzemeleri lif ve kumaş yapıların yanında bu lif ve kumaşların takviye elemanı olarak kullanıldığı kompozit malzemelerde yer almaktadır. Özellikle günümüzde gelişmiş ateşli silahların yer alması sebebiyle tek başlarına tekstil malzemeleri yeterli kalamamakta ve bazı reçeteler doğrultusunda yüksek dayanımlı kompozit malzemeler elde edilmektedir.

Kompozit malzemelerin elde edilme yöntemleri el yatırma yöntemi, kapalı kalıp ta soğuk ve sıcak pres yöntemi, vakum infuzyon yöntemi, reçine transfer kalıplama, pültrüzyon yöntemi, sprey püskürtme yöntemi, lif sarma yöntemi ve otoklav pişirme yöntemi gibi yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden bazıları endüstriyel üretimler için de kullanıma uygunken bazı yöntemler ise maliyetlerinin yüksekliği nedeni ile laboratuvar ortamında üretimler için tercih edilmektedir.

Balistik amaçlı koruma için ise üretilecek olan zırh amaçlı kompozitler daha çok hafif olması ve dayanımın yüksek olması amacıyla planlandığı ve bu plan

doğrultusunda tekstil ürünlerinin takviye elemanı olarak lif veya kumaş şeklinde kullanılmasıyla üretilen kompozitlerdir.

Ancak balistik koruma amaçlı kullanılacak olan kompozit malzemelerin takviye yada ara eleman olarak yalnızca lif yada kumaş değil lif ve kumaşlara, toz partiküllerin, metal alaşımlı içeriklerin, cam liflerin vb. gibi malzemelerden ek olarak kullanılması da yapılan çalışmalarda görülmektedir. Buda yalnız başına ara eleman olarak lif yada kumaşların kullanılmasının da zayıf kalabileceğini bu özelliklerin ise başka malzemeler yardımı ile geliştirilebileceklerini göstermektedir.

Balistik koruma amaçlı kompozitler araştırmalar sonunda gelecek vadeden sonuçlar vermiştir. Örneğin silva ve ark. 2019 da yapmış oldukları çalışmalarında UHMWPE laminantları Kevlar® kumaş ve EVA filmler ile otoklav kompozit oluşturma yöntemiyle kompozit yapıları oluşturmuş bu kompozit yapıların içinden en iyi balistik performansı %75 UHMWPE %25 ara elaman (kevlar ve eva film) konfigürasyonunda olduğunu raporlamıştır. Başka bir çalışma olan Jabbar ve arkadaşları ise 2019 da yapmış oldukları silika nanopartikulerinin Kevlar®/epoksi hibrit kompozitlerinin mekanik özelliklerine etkisi üzerine yapmıştır. %8 oranındaki silika nanopartiküllerinin matris mukavemetini artırdığını raporlamış ancak burada ise %8 oranından fazla konulan nanopartüküller ise olumsuz etki yaratığını ortaya koymuşlardır.

Bütün bu çalışmalar incelendiğinde kompozit yapıların balistik için önemlerini ortaya koymaktadır. Örnek verecek olursak tek başina lifden mamül kumaşın balistik anlamda koruma sağlayabilmesi için en az 15 kattan fazla (20-50 kat) olması beklenirken araştırma sonuçlarına bakıldığında kompozit olarak elde edilmiş ya da kompozit laminant olarak üretilmiş kompozit yapıların içindeki kumaşların kat sayılarının yarı yarıya kadar düştüğü gözlenmektedir. Ateşli silahlarda ise tek başlarına kumaş kullanılarak elde edilmiş yapıların en az 40 kat kumaş yapıların kullanılması görülürken kompozit olarak elde edilen yapıların ise 7 ile 15 kat aralıkların da 40 kat kumaşla aynı seviyelerde koruma sağladığı görülmektedir. Kompozitlerin bu artı özelliklerine ek olarak mekanik

dayanımlarında da artışlar gözlenmiş ve daha hafif oldukları raporlanmıştır. Fakat kompozitlerde bazı yetersiz tarafların ortaya çıkması sonucunda tekstil takviyeli kompozitlere dayanımlarını artırmak için seramik katkılar da eklenmiştir. Silva ve ark. 2019, yapmış olduğu çalışmada seramik nano silika partüküllerinin eklenmesinin olumlu sonuçlar ortaya koyduğu görülmüştür.

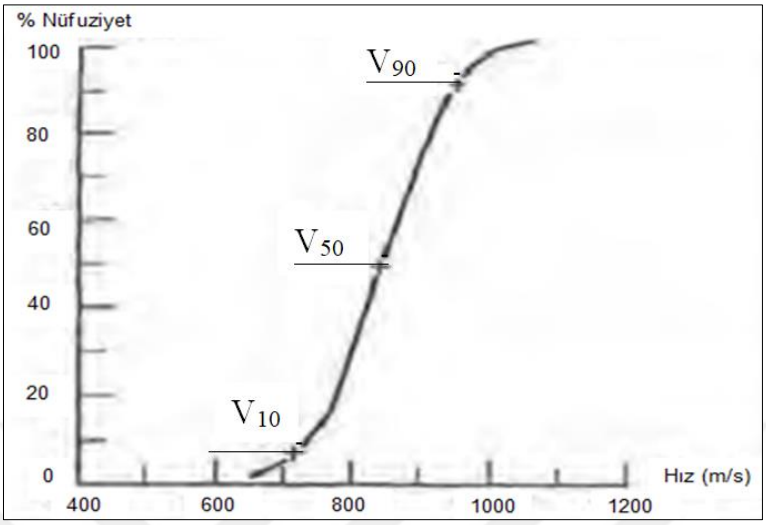
Kompozit yapıların balistik koruma amaçlı üretiminde tekstil ürünleri ile takviyeli kompozit olarak kullanımları araştırmalarda görüldüğü gibi bazı özelliklerini olumlu yönde artırmakta ve daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmektedir. Araştırmaların sürekli yenilenmesi gerektiği bu alanda geniş çalışmalara yer verilmesinin gerekli olduğu düşünülmektedir. Bu çalışmada da incelenen litaratür çalışmaları doğrultusunda gelişmelere açık bir alan ve ihtiyacın olduğu görülmüştür.

6. SONUÇ

Günümüzde üretilmiş balistik koruyuculara örnek verecek olursak kişisel vücut koruyucu amaçlı balistik koruyucular yumuşak vücut zırhları ile araç ve malzeme koruması sağlayan sert yapılı balistik zırhlardır. Koruma sağlamak amaçlı dış etkenlerin olumsuz etkilerinden hem de ateşli silahların etkilerinden korumak, yaralanmaları en aza indirgemek için insan hayatını kurtarmaya yönelik sistemler ve malzemeler üretilmiştir. Bu sistemler ve malzemelerin üretimi için bazı standartlar belirlenmiştir. Bu standartlar dünyadaki silah türlerinin verdiği hasarlar göz önüne alınarak geliştirilmiştir. Üretilen yumuşak ve personel koruyucu vücut zırhları için dünyada en etkin standart olarak kullanılan balistik standartları NIJ. Standartları olarak yer almaktadır (Tablo 6.1). NIJ standartını destekler nitelikte üretilen bazı malzemelere uygulanan başka testlerde vardır bu testler arasında en belirgin ve fazla kullanılanı ise V_{50} balistik limit hız testidir. Bu testte ise koruyucu malzeme nüfus edebilecek en yüksek hızdaki merminin hız referansları belirlenmektedir (Şekil 6.1). Balistikte en çok uygulanan iki standart NIJ-0101.06 güncellenmesi ile NİJ standartları ve V_{50} balistik limit hız testidir. NIJ-0101.06 standartında hangi silah türü ve hangi mermi türünün kullanıldığı seviyeler olarak belirtilerek balistik koruyucu zırhın hangi seviyede koruyuculuğa sahip olduğu tespit edilmektedir. V_{50} balistik limit hız testinde ise koruyucuya ateş edilen merminin koruyucu zırhı deldiği andaki en yüksek hızdaki mermi hızı belirlenmektedir, yani koruyucu zırhın delinmeden önceki merminin en yüksek hızı V_{50} balistik limit hız testi ile belirlemiş olmaktadır.

Tablo 6.1. NIJ-STD-0101.06 standartı koruma seviyeleri (NIJ Standard-01.01.06, 2008)

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



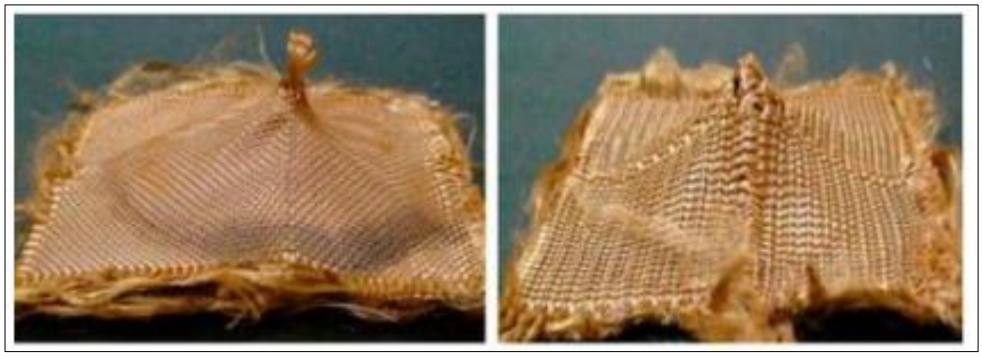
Şekil 6.1. V_{50} balistik limit hız testi grafiği örneği.

Balistikte koruyuculuğun standartı olduğu kadar malzemenin dayanımlarının önemi artmıştır. Bu malzemelerde teknolojinin gelişmesiyle birlikte darbe dayanım performansı yüksek, hafif, ergonomik ve yüksek seviyede insan hayatını koruma sağlayacak malzeme geliştirmek amaçlı giyilebilir koruyucu zırhlar yapılmaktadır. Bu giyilebilir koruyucu zırhların geliştirilmesinde tekstil bazlı ürünlerin kullanımı çok fazladır. Bu tekstil ürünlerinde lifler ve liflerden elde edilen kumaşlar olarak kullanımı bulunmakta olup kullanılan lif ve bunlardan elde edilen kumaşlardaki liflerin başında karbon, aramid, dyneema, gibi yüksek mukavetli teknik tekstil lifleri yoğun şekilde kullanılmaktadır. Bu teknik tekstil liflerinden balistikte kullanılan liflerin bazı mekanik özellikleri Tablo 6.2.'de verilmiştir. Balistik konusu üzerine yapılan çalışmalarda, özellikle son yıllarda balistik plaka ve kişisel vücut koruyucu zırhların üretimi ile ilgili çalışmalar vardır. Metal malzemeden üretilmiş koruyucular ağırlıklarının çok olmasından dolayı hareket kabiliyetlerini sınırlandırmaktadır. Balistik amaçlı koruyucu zırh üretiminde ağır olan metal ürünler yerini mekanik ve fiziksel özellikleri yüksek olan liflerden oluşan kumaşlar (Aramid, UHMWE, PBO, Cam Lifler ve PPID) kullanılmaya başlanmıştır (Sözen ve ark. 2016).

Tablo 6.2. Yüksek mukavemet dayanımlarına sahip teknik tekstil liflerinin mekanik özellikleri karşılaştırılması

Fiber	**Yoğunluk(g/cm^3)**	**Kopma dayanımı (GPa)**	**Modül (GPa)**
Karbon	1,78-2,00	2,7-3,4	230-390
Aramid	1,45-1,47	2,8	60-120
PBO(Poli-pfenilenbenzobisoksazol) Lifleri	1,5	5,6-5,8	180-280
PBI (Poli-benzimidazol) Lifleri	1,3-1,43	0,4	5,9
PPID (Poli-piridobisimidazol) Lifleri	1,7	3,5-6	330-360
UHMWPE	0,97	1,7-4,0	90-150

Kumaşların, metal ve seramik malzemelerin yerini almasında büyük etken olarak hafif olmaları, ağırlığına oranla performanslarının daha yüksek olması ve kullanıcıların rahat hareket etmelerini sağlamaları olarak sayabiliriz. En fazla tercih edilen kumaş türleri olarak, aramid, yüksek molekül ağırlıklı polietilen (HMWPE), PBO ve PPID kumaşları yer almaktadır (Yumak ve ark. 2013).



Şekil 6.2 PBO liflerinden yapılmış kumaşlar (Behera ve Dash, 2013)

Balistik amaçlı kullanılan liflerden ise gerek giyilebilir koruyucu amaçlı zırh yelekler ya da anlık savunma amaçlı çanta şeklinde koruyucular üretimi için dokunmuş kumaş şeklinde kullanımları mevcuttur. Bunların üretimi için teknik tekstil lifleri olan bu yüksek mukavemet dayanımına sahip liflerin işlenerek dokuma kumaş yapısı haline getirilmesi gerekmektedir. Dokuma kumaş konstriksiyonlarından elde edilen ürünler ile ilgili litaratürdeki kevlar kumaşlar üzerindeki araştırmalarda ise tek katlı kumaş tiplerinde limit hız dayanımı en yüksek olan 1/1 bezayagı yapısına sahip dokuma kumaş olduğu bunu ise 2*2 sepet örgü ve 3*3 sepet örgü sisteminin izlediği görülmüştür (Tablo 6.3) .

Tablo 6.3. Çeşitli kumaş konstrüksiyonları ve mermi tipleri için tek katmanlı limit hız. (Chua ve Chena 2010)

No	Kumaş yapısı	Kumaş kalınlığı, mm	AP çelik özlü 5.1g mermi		AK 47 M43 8g FMJ Mermi	
			Limit hız, m/s	Normalize limit hız*, m/s	Limit hız, m/s	Normalize limit hız, m/s
1	1/1 bezayağı	0.47	58	123	79	168
2	8H Saten	0.52	20	38	25	48
3	1/3 dimi	0.46	31	67	41	89
4	2/2 dimi	0.45	41	91	55	122
5	2*2 sepet	0.45	53	118	67	149
6	3*3 sepet	0.70	53	76	56	80

* - Sınır hızın değeri 1,0 mm kumaş kalınlığına normalleştirilir.

Balistik koruma amaçlı kullanılan tekstil malzemelerin yetersiz olduğu durumlar için bu lif ve kumaşların takviye elemanı olarak kullanıldığı kompozit malzemeler üretilmektedir. Teknolojinin de ilerlemesi ile ateşli silahlardan daha etkin koruna bilmek için kompozit malzemelerin öneminin artmış olduğu görülmektedir. Balistik amaçlı koruma için darbe dayanımı yüksek olması amacıyla kompozit malzemeler geliştirilmiş ve bu geliştirilen kompozit malzemeleri için tekstil ürünlerinin takviye elemanı olarak lif veya kumaş şeklinde kullanılmasıyla kompozit üretimi sağlanmıştır. Ancak balistik koruma amaçlı kullanılacak olan kompozit malzemelerin takviye ya da ara eleman olarak yalnızca lif ya da kumaş kullanılmamıştır. Lif ve kumaşların kullanımlarının yetersiz olduğu durumlarda meydana gelmiştir. Bunların eksik kalan özelliklerini tamamlayabilmek amaçlı toz partiküllerin, metal alaşımlar, cam lifleri vb. gibi malzemelerden ek olarak kullanılması da yapılan çalışmalarda görülmektedir. Buda yalnız başına ara eleman olarak lif yada kumaşların kullanılmasının yetersiz kaldığını ve yetersiz kalan özelliklerin ise başka malzemeler yardımı ile geliştirilebileceğini göstermektedir.

Balistik koruma amaçlı kompozitler araştırmalar sonunda gelecek vadeden sonuçlar vermiştir. Örneğin silva ve ark. 2019 da yapmış oldukları çalışmalarında UHMWPE laminantları Kevlar® kumaş ve EVA filmler ile otoklav kompozit oluşturma yöntemiyle kompozit yapıları oluşturmuş bu kompozit yapıların içinden %100 UHMWPE'ye göre en yakın sonuçlar, en iyi %75 UHMWPE %25 ara elaman (kevlar ve eva film) konfigürasyonunda olduğunu raporlamışlardır. Başka bir çalışma olan Jabbar ve arkadaşları ise 2019 da yapmış oldukları silika nanopartikulerinin Kevlar®/epoksi hibrit kompozitlerinin mekanik özelliklerine etkisi üzerine yapmıştır. %8 oranındaki silika nanopartiküllerinin matris mukavemetini artırdığını raporlamış ancak burada ise %8 oranından fazla konulan nanopartüküllerin ise olumsuz etki yarattığını ortaya koymuşlardır.

Yapılan araştırmalar kompozit yapıların balistikte önemlerini ortaya koymaktadır. Örnek verecek olursak tek başına liften mamul kumaşın balistik anlamda koruma sağlayabilmesi için ateşli silahlarda tek başlarına kumaş kullanılarak elde edilmiş yapıların en az 40 kat kumaş kullanılması gerekmektedir. Kumaşların kat sayısını azaltıp çeşitli polimer veya daha güçlü yapıya getirecek maddeler ile birleştirilmesiyle de balistik koruma amaçlı daha dayanıklı ve daha hafif kompozit ürünler elde edilmiştir. Literatürde alüminyum, cam takviyeli plastik (CTP), seramik çelik ve kumaşların balistik uygulamalarda tabakalı olarak kullanıldığına dair çeşitli çalışmalar mevcuttur. Balistik amaçlı koruyucu zırh yelekleri ve koruyucu ekipmanların oluşumunda bulunan kumaşlar incelendiğinde çeşitli dokuma yapılardaki kumaşların birden fazla katlı yapı olarak kullanımı vardır. Kompozit olarak elde edilen yapılarda ise 7 ile 15 kat aralığında kumaşlar kullanılmıştır. Kompozit yapıların daha üstün özellikler sergiledikleri görülmektedir. Kompozitlerde ek olarak mekanik dayanımlarında da artışlar gözlenmiş ve daha hafif oldukları için kullanımda kolaylık sağlayacaklarından daha ergonomik oldukları raporlanmıştır.

Kompozit malzemelerde takviye elemanları olarak lif ve dokuma kumaşların kullanımına ek bunların eksik kalan yanlarını takviye edici başka malzemelerinde

kullanım gereksinimi görülmektedir. Bu takviyeler arasında seramik tozlar gibi malzemeler öncelikli kullanılmaktadır. Seramik tozlar genellikle mekanik özelliklerin artırılmasında rol almakla beraber toklukları sayesinde malzemeyi basınca ve ısıya dayanımlı hale getirmektedir. Kompozit malzeme üretiminde kullanılan birçok seramik toz bulunmaktadır. Bunlardan bazıları; alimuna(Al2O3),silisyum karür (SiC), Bor nitrür (BN) gibi birçok tozdur. Seramik tozlar genel anlamda ısı absorbe etme ve mekanik dayanımlarından dolayı tercih edilmektedir. Bunun yanı sıra seramik tozlar balistik alanda kullanımı olarak aşındırıcı özelliktede olması istenmektedir. Aşındırıcı seramik tozların bazıları ise; Silisyum karbür (SiC), bor karbür (B4C), bor nitrür (BN) gibi birçok aşındırıcı ve ısıyı absorbe eden seramik tozlar bulunmaktadır. Seramik tozlardan aşındırıcı özellikte olanlar genellikle karbür ve nitrür içerikli sertlik değerleri yüksek olan tozlardır. Balistikte dayanımın yanı sıra ergonomik açıdan malzemelerin hafif olmasıda istenmektedir. Tekstil malzemelerin kompozit malzeme içinde kullanılması hafiflik sağlaması açısından önemlidir.

Özetle en başarılı balistik lif çeşitleri aramid, PIPD ve UHMWPE şeklindedir. En iyi kumaş yapıları, 3 boyutlu (3D) yapılar, bezayağı yapılar ve 2x2 ve 3x3 sepet örgü sistemleridir. 3D yapılarının öne çıkmasının nedeni sürekli devam ederek oluşturulması ve liflerde kopukluk olmadan devam etmesidir. Buna ek olarak bezayağı ve sepet örgü yapılarının balistik performansta iyi sonuç vermesinin nedeni dokuma yapısının oluşturduğu sıkı yapı sayesinde lifler arası sürtünme ve mermi enerjisinin absorbe edilerek engellemesidir. Kompozit yapılarda ise lif ve matris yapısının birbirini tam örtücü şekilde kapatması ve liflerin matris malzemesi içinde mermi enerjisini absorbe edebilmek amaçlı mermi enerjisini tüm malzemeye yayma açısından önemlidir. Eksik kalan kompozit yapıların ise ekstra olarak farklı malzemeler ile özellikle seramik toz katkıları yardımıyla merminin enerjisini tamamen emebilecek sistemlerin oluşturulması önemli olmuştur. Balistik amaçlı koruyucu sistemlerde en çok kullanılan kompozit

sistemler ise polimerik matris yüksek dayanımlı tekstil lifinden mamul kumaş ve bunlara ek olarak seramik aşındırıcı özellikli ve ısı yalıtımı yüksek olan tozlardır.

Malzemelerin balistik amaçlı kullanımları incelendiğinde günümüz de teknolojinin gelişmesi ve ateşli silahlarında gelişimine yol açmasından dolayı her geçen gün daha üstün koruma gerektiren malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Buradan yola çıkarak balistik amaçlı tekstil takviyeli ürünlerin gerek hafiflik gerekse dayanımları konusunda araştırmaların sürekli yenilenmesi farklı takviye elemanlarının kullanımının çalışmalarda yer verilmesinin gerekli olduğu düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

Afshari, M., Sikkema, D.J., Lee, K., Bogle, M., 2008. High Performance Fibers Based on Rigid and Flexible Polymers. Polymer Reviews, 48, (2), 230-274s.

Akman, Y., 2012. Eskitmeye Tabi Tutulan Kompozit Başlıkların Balistik Testlerinin Yapılması ve Analiz. Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Balıkesir, 49s.

Alarçin, S., 2014. Savunma Sanayiinde Kullanılan Kompozit Malzemelerin Balistik Özelliklerinin İncelenmesi. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Afyonkarahisar,89s.

Aly, S.Y., ve Li, Q.M,; 2008. Critical Impact Energy for the Perforation of Metallic Plates. Nuclear Engineering and Design, 238, 10, 2521–2528s.

Ansari, Md, M., ve Chakrabarti, A., 2017. Impact behaviour of GFRP and Kevlar/epoxy sandwich composite plate: Experimental and FE analyses, Journal of Mechanical Science and Technology 31, 2, 771-776s.

Arıcasoy, O., 2006. Kompozit sektör raporu. İstanbul Ticaret Odası, İstanbul

Arkaz H., 2016. Elle Yatırma Yöntemi (Hand Lay up) ile Kompozit Malzeme Üretimi. https://docplayer.biz.tr/27778498-Elle-yatirma-yontemi-hand-lay-up-ile-kompozit-malzeme-uretimi.html, 11s.

Azrin Hani, A.R., Roslan, A., Mariatti, J. ve Maziah, M., 2012. Body Armor Technology: A Review of Materials, Construction Techniques and Enhancement of Ballistic Energy Absorption. Advanced Materials Research, 488-489, 806-812s

Barton, J., Borsig, E., 1988. Complexes in Free-Radical Polymerizations. Polymer Science Library, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, Oxford, New York, 296s

Behera, B., Dash, B., 2013. An Experimental Investigation into Structure and Properties of 3d-Woven Aramid and PBO Fabrics. The Journal of The Textile Institute, 104, (12), 1337-1344s.

Ben G., Hirabayashi A., Sakata K., Nakamura K. Ve Hirayama N., 2015. Evaluation of new GFRTP and CFRTP using epsilon caprolactam as matrix fabricated with VaRTM. Sci Eng Compos Mater 22,6, 633–641s.

Beşergil, B., Polimer Matris Kompozitler; Üretim Prosesleri (production processes) internet sayfası (blog sayfa), http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/blog-page_96.html internet erişim tarihi: 21 Temmuz 2020

Bhatnagar, A., 2006. Lightweight Ballistic Composites: Military and Law-Enforcement Applications.Woodhead Publishing, 448s.

Bourbigot, S., ve Flambard, X., 2002. Heat Resistance and Flammability of High Performance Fibres: A Review, Fire and Materials, 26, (4-5), 155-168s.

Bourbigot, S., Flambard, X., Ferreira M., Devaux E., Poutch F., 2003. Characterisation and Reaction to Fire of "M5" Rigid Rod Polymer Fibres. Journal of Materials Science, Kluwer Academic Publishers, 2187-2194s.

Bozdoğan, F., Üngün, S., Temel E., Süpüren Mengüç G., 2015. Balistik Koruma Amaçlı Kullanılan Tekstil Materyalleri Özellikleri ve Balistik Performans Testleri. Journal of Textiles and Engineer, 22,(98), 84-103s.

Brinker, K.C., Robinson, I.M., 1959. Polybenzimidazoles. US Patent 2,895-948.

Briscoe, B.J., ve Motamedi, F.. 1992. The ballistic impact characteristics of aramid fabrics: The influence of interface friction. Wear 158,1-2, 229-247s.

Bunsell, A.R., 2009. Handbook of Tensile Properties of Textile and Technical Fibres. Woodhead Publishing Limted, Cambridge, 666s.

Callister, W. D. Jr., 2007. Materials Science and Engineering: An Introduction. USA: John Wiley & Sons, 7. Baskı, 975s.

Campbell F.C. 2004 Manufacturing Processes for Advanced Composites. Chapter 6 - Curing: It's a Matter of Time (*t*), Temperature (*T*) and Pressure (*P*). 175-221s.

Cao, S., Pang, H., Zhao, C., Xuan, S., Gong, X., 2020. The CNT/PSt-EA/Kevlar composite with excellent ballistic performance, Composites Part B: Engineering, 185, 1-9s.

Cerit, A.A., 2004, Partikül ve Fiber Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitin Balistik Performansının İncelenmesi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Kayseri, 126s

Cervenka, A., Young, R.; Kueseng, K. 2005. Micromechanical Phenomena During Hygrothermal Ageing Of Model Composites Investigated By Raman Spectroscopy. Part II: Comparison Of The Behaviour Of PBO and M5 Fibres Compared With Twaron. Composites Part A, Applied Science And Manufacturing, 36, 7, 1020-1026s.

Chae, H.G., Kumar, S., 2006. Rigid Rod Polimeric Fibres. Journal Of Applied Polymer Science, 100, (1), 791-802s.

Chandrashekhara, K., Sundararaman, S., Flanigan, V., Kapila, S., 2005. Affordable Composites Using Renewable Materials. Materials Science and Engineering A, 412, 2-6s.

Chang, K. K., 2001. Composites-Aramid Fibers, ASM Handbook, ASM International, 21, 107s.

Cheeseman, B.A., Bogetti, T.A., 2003. Ballistic Impact into Fabric and Compliant Composite Laminates. Composite Structures, 61, (1–2), 161-173s.

Chen, X., Sun, D., Wang, Y., Zhou, Y., 2012. 2D/3D Woven Fabrics for Ballistic Protection. School of Materials, University of Mancheste, 12s.

Chen, X., Zhu, F., Wells G., 2013. An analytical model for ballistic impact on textile based body armour, Composites Part B: Engineering 45, 1, 1508-1514s.

Chenevey, E.C., Helminiak, T.E., 1986. Process for Preparing Shaped Articles of Rigid Rod Heterocyclic Liquid Crystalline Polymers. Google Patents.Patent no: US4606875A United States

Chitrangad, I., 1993. Hybrid Ballistic Fabric, Patent No. 5,187,003. Available online at http://www.freepatentsonline.com/5187003.pdf, erişim tarihi:20 ocak 2020.

Chua, Cheng ,K., Chena Yu-L., 2010. Ballistic-proof Effects of Various Woven Constructions. Fıbres & Textıles İn Eastern Europe, 18, 6. 63-67s.

Clark, J.H., Macquarrie, D.J., 2008. Handbook of Green Chemistry and Technology. John Wiley & Sons, New Jersey,539s.

Collier, B.J., Tortora, Q.C., 2000. Understanding Textiles. Prentice Hall, New Jersey, (6)576s.

Cunniff, P.M., 1992. An analysis of the system effects in woven fabrics under ballistic impact. Textile Research Journal, 62,(9), 495-509s.

Cunniff, P.,M., 1999. (a) Dimensionless parameters for optimization of textile-based body armor systems. Proceedings of the 18th International Symposium on Ballistics, San Antonio, Texas. W.G. Reinecke, ed. Lancaster, Penn.: Technomic, 1303-1310s.

Cunniff, P.M., 1999. (b) The Performance of Poly (Para-Phenylene Benzobizoxazole) (PBO) Fabric for Fragmentation Protective Body Armor. Proceedings of the 18th International Symposium on Ballistics, 814-821s.

Cunniff, P.M., Auerbach, M.A., Vetter, E., Sikkema, D.J., 2002. High Performance "M5" Fiber For Ballistics/Structural Composites. 23rd. Army Science Conference. U.S. Army Soldier and Biological Chemical Command Natick, MA.

Çay, A., Süpüren, G., Kanat, Z. E., Gülümse, T., Tarakçıoğlu, I., 2007. Balistik Lifler (bölüm 1). Tekstil ve Konfeksiyon dergisi,4, 232-236s.

Çelik, K.V., ve Karaşin, H., 2014. Karbon Elyaf İle Beton Güçlendirme. Mühendislik Dergisi, Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Diyarbakır, 5 (1), 1-11s.

Çelikkanat, A.B., 2002. Teknik Tekstiller. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Tekstil Mühendisliği Anabilimdalı, İstanbul,148s.

Çerkez, İ., 2007. Kolloidal Silika Dispersyonunun Polietilen Kumaşların Balistik Performansına Etkisi. T.C. Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,70s.

Çerkez, İ., Ulcay Y., 2007. Kolloidal Silika Dispersiyonunun Polietilen Dokusuz Yüzeyin Enerji Absorbsiyonuna Olan Etkisi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 12,2,71-84s.

Denchev, Z., Dencheva, N., 2012, Manufacturing And Properties Of Aramid Reinforced Composites. Synthetic Polymer-Polymer Composites, Hanser Publishers, 251-280s.

Dischler, L. 2001. Bullet Resistant Fabric and Method of Manufacture. U.S. Patent 6,248,676.

Duan, Y., M. Keefe, Bogetti, T.A., ve Cheeseman, B.A., 2005. Modeling friction effects on the ballistic impact behavior of a single-ply high-strength fabric. International Journal of Impact Engineering, 31,8, 996-1012s.

Durgun, İ., 2014. Vakum İnfüzyon Yöntemi İle Kompozit Parça Üretimi. 7. Otomotiv Teknolojileri Kongresi, Bursa

Eichhorn, S., Hearle, J.W., Jaffe, M., Kikutani, T. 2009a. Handbook of Textile Fibre Structure Volume 1: Fundamentals And Manufactured Polymer Fibres; Woodhead Publishing Limited: Cambridge, 528s.

Eichhorn, S., Hearle, J.W.S., Jaffe, M., Kikutani, T., 2009b. Handbook of Textile Fibre Structure Volume 2: Natural, Regenerated, inorganic and Specialist Fibres. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 536s.

Elices, M., Llorca, J., 2002. Fiber Fracture. Elsevier Science Ltd., Oxford, 393s.

Erdem, M., Türker, M., 2011, 7039 Alüminyum Alaşımının Kaynak Öncesi ve Sonrası Mekanik ve Balistik Özelliklerinin Araştırılması, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 26, No 1, 17-26s.

Eren, Y., 2007. Kompozit Yapıların Darbe Etkisinin İncelenmesi. Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Kütahya, 58s.

Frame, B.J., Hansen, J.G.R., 2002. Fire Resistant Composite Materials for Energy Absorption Applications. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, 15s.

Fung, W., Hardcastle, M., 2000. Textiles in Automotive Engineering, Woodhead Publishing, Cambridge,1, 384s

Grogan, J., Tekalur, S.A., Shukla, A., Bogdanovich, A., ve Coffelt, R.A. 2007. Ballistic resistance of 2D and 3D woven sandwich composites. Journal of Sandwich Structures & Materials, 9,3, 283-302s.

Grujicic, M., Glomski, P.S., He T., Arakere, G., Bell, W.C. and Cheeseman, B.A., 2009, Material Modeling and Ballistic-Resistance Analysis of Armor-Grade Composites Reinforced with High-Performance Fibers, Journal of Materials Engineering and Performance, 18(9), 1169-1182s.

Grujicic, M., Bell, W.C., Arakere, G., He, T., Tie, X., ve Cheeseman, B.A.. 2010. Development of a meso-scale material model for ballistic fabric and its use in flexible-armor protection systems. Journal of Materials Engineering and Performance, 19,1, 22-39s.

Gupta, B.S., 2008, Friction in Textile Materials. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 488s.

Hazell, P.J., Appleby, G., 2009, A Study on the Energy Dissipation of Several Different CFRP-Based Targets Completely Penetrated by a High Velocity Projectile, Composite Structures, 91, 103-109s.

Hearle, J.W., 2001. High-Performance Fibres. CRC Press, Cambridge, 344s.

Hearle, J.W., Morton, W.E., 2008. Physical Properties of Textile Fibres. CRC Press, Cambridge,796s.

Holmes, G.,Rice,K., Snyder, C., 2006. Ballistic Fibers: A Review of The Thermal, Ultraviolet and Hydrolytic Stability of The Benzoxazole Ring Structure. Journal of Materials Science,41, 13, 4105-4116s.

Hongu, T., Takigami, M., Phillips, G., 2005. New Millennium Fibers. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 312s.

Horrocks, A.R., 2005. Tekstilde Yeni Ufuklar " Teknik Tekstiller". Bölüm: Koruyucu Amaçlı Tekstiller (Protech) ve Uygulamaları. İstanbul Ticaret Odası, İstanbul,113s.

Horrocks, A.R. ve Price, D., 2008. Advances in Fire Retardant Materials. Elsevier, Cambridge,632s.

Houcks, M.M. 2009. Identification Of Textile Fibers. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, Washington DC, 12-13s.

Http://En.Wikipedia.Org/Wiki/M5_Fiber (a), M5 Fiber. Erişim: 19 Ocak 2020

Http://en.wikipedia.org/wiki/Polybenzimidazole_fiber (b), Polybenzimidazole Fibers. Erişim Tarihi: 25 Ocak 2020

Http://en.wikipedia.org/wiki/Zylon (c), Zylon. Erişim Tarihi: 21 Ocak 2020

Http://textilelearner.blogspot.com.tr/2013/09/electrospinning-technology-properties.html , Electrospinning Technology. Erişim Tarihi: 21 Temmuz 2019

Https://tr.banggood.com/Universal-Waterproof-Backpack-Motorcycle-Bike-30L-Carbon-Fiber-Backpack-Riding-Racing-Storage-Bag-p-1320258.html?cur_warehouse=CN Erişim tarihi:19 Ağustos 2019

Https://tr.sodiummedia.com/4300487-roman-armor-description-names-and-materials-for-making Roma Zırhı: Tanımı, İsimleri ve Yapımı İçin Malzemeler, Erişim Tarihi: 30 Eylül 2019

Http://www.acarerugur.com/FileUpload/op325540/File/balistik__calismalarda__kullanilan__hammadde__ve__kompositler.pdf, Balistik Çalışmalarda Kullanılan Hammadde ve Kompozitler, Erişim Tarihi: 19 Eylül 2019

Https://www.advenport.com/makale/karbon-fiber-hakkinda-bilmeniz-gereken-9-sey Erişim tarihi:19 Ağustos 2019

Http://www.bodyarmornews.com/wp-content/uploads/2013/10/DSM_Ballistic_Standard.pdf International Standards for Personal Armor, Erişim Tarihi:10 Ekim 2019.

Http://www.carbonfiber.life/?p=738 , What are composites?. Erişim tarihi: 19 Temmuz 2019

Https://www.defenceturk.net/balistik-koruyucu-kasklar Erişim tarihi: 19 Ağustos 2019

Https://www.dsm.com/products/dyneema/en_GB/home.html?WT.srch=1&WT.mc_id=SEA_branded_dyneema_americas-apac-emea&gclid=CjwKCAjwqqrmBRAAEiwAdpDXtLrDExC8oHNbgio_hgC18AgGAG_9yMgDQCPEBIYjM4MEL9iASeuyDRoCaFwQAvD_BwE Erişim Tarihi: 18 Temmuz 2019

Https://www.dupont.com.tr/urunler-ve-hizmetler/elyaflar-kumaslar-ve-dokunmamis-malzemeler/iplikler/brands/kevlar/products/dupont-kevlar-fiber.html , Kevlar elyaf, Erişim Tarihi: 22 Eylül 2019

Https://www.ec21.com/ec-market/kevlar.html , Erişim tarihi: 29 Ekim 2019

Https://www.egm.gov.tr/kriminal/balistikuzmanlik, Balistik, Emliyet Genel Müdürlüğü, Erişim Tarihi: 29 Ağustos 2019

Https://www.eppcomposites.com/spray-layup-process.html, Spray lay-up Process. Erişim tarihi: 6 Şubat 2020

Http://www.formula1-dictionary.net/zylon.html , Zylon (PBO). Erişim tarihi: 29 Temmuz 2019

Http://www.futurefibres.com/Rigging/Technology/Core-Technology/Core-Fibres/PBO.html , Future Fibres - Tomorrow's Innovation. Erişim Tarihi: 4 Ağustos 2019

Http://www.globalsecurity.org/military/systems/munitions/bullets.html , Military Erişim tarihi: 29 Eylül 2019

Http://www.gurit.com/core/core_picker/download.asp?documenttable=libraryfiles&id=449 , 2009. Reinforcing Fibres & Finishes [online]. Gurit (UK) Ltd, Erişim tarihi: 28 Ocak 2020

Https://www.malzemebilimi.net/karbon-elyaf-nedir.html , Karbon Elyaf Nedir?. Erişim tarihi:19 Ağustos 2019

Https://www.mbfg.co.uk/QL7654.html , Erişim Tarihi: 19 Ocak 2020

Https://www.officer.com/home/product/10047499/warwick-mills-pbi-turtleskin , PBI Turtleskin. Erişim Tarihi:11 Eylül 2019

Https://www.pbiproducts.com/fabrics/pbi-glove-fire-knight/ , PBI Glove – Fire Knight. Erişim Tarihi: 10 Eylül 2019

Https://www.primesafetyusa.com/product/pac-ia-pbi-goldpbi/ , Erişim Tarihi: 10 Eylül 2019

Https://www.teijinaramid.com/en/?gclid=Cj0KCQiAmZDxBRDIARIsABnkbYQh0HDFOV8BWbcBFI0aEvQQwmjv1IQVHDRYqgC6yrkUOIy6fPdahEgaAsKrEALw_wcB , Teijin Company. Erişim Tarihi: 18 Aralık 2019

Http://www.tekniktekstiller.com/articles/aramid-lifleri/ , Aramid lifleri Erişim Tarihi:12 Eylül 2019

Https://www.teknolojiprojeleri.com/mekanik/kompozit-malzeme, Kompozit Malzeme Nedir?, Kullanım Alanları? Nasıl Üretilir?. Erişim tarihi:15 Ağustos 2019

Http://www.toyobo-global.com/seihin/kc/pbo/Technical_ Information_2005.pdf , 2005. PBO Fiber Zylon. Toyobo Co., LTD. Erişim Tarihi:18 Ağustos 2019

Http://www.turkcadcam.net/rapor/kompozit-malzemeler/index2.html , Polimer Esaslı Kompozit Malzemeler Ve Ürün Tasarımında Kullanımları, Erişim Tarihi: 3 Şubat 2020

Http://www2.dupont.com/Media_Center/en_US/news_releases/2005/nr04_04_05a.html , 2005.Dupont To Acquire Majority Interest In Magellan Systems International. Erişim:19 Temmuz 2019.

Hu, X., Lesser, A.J., 2004. Post-Treatment of Poly-PPhenylenebenzobisoxazole (PBO) Fibers Using Supercritical Carbon Dioxide. Polymer Science and Engineering Department, University of Massachusetts, Amherst.

Hu, J., 2008. Fabric Testing. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 424s.

Ismail, M. F., Sultan M.T.H., Hamdan A.,a ve Shah A.U.M., 2018. A Study on the Low Velocity Impact Response of Hybrid Kenaf-Kevlar Composite

Laminates through Drop Test Rig Technique. BioResources, BioResources 13,(2),3045-3060s.

Işık, H., Değirmenci, E. ve Evci, C., 2013, Örgülü Kumaşların Balistik Darbe Enerji Sönümleme Mekanizmalarının incelenmesi, Savunma Bilimleri Dergisi, Cilt: 12, Sayı: 2, 145-162s.

Jabbar, M., Karahan, M., Nawab, Y., Ashraf, M., Hussain,. T., 2019. Effect of silica nanoparticles on mechanical properties of Kevlar/epoxy hybrid composites, The Journal of The Textıle Instıtute, 110,4, 605-613s.

Jacobs, M., J., N. 1999. Creep of Gel-Spun Polyethylene Fibres. Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, 197s.

Jeong, Y.G., Baik, D.H., Jang, J.W., Min, B.G., Yoon, K.H., 2014. Preparation, Structure and Properties of Poly (PPhenylene Benzobisoxazole) Composite Fibers Reinforced with Graphene. Macromolecular Research, 22, (3), 279-286.

Kalaycı, E., Avinç, O., Yavaş, A., 2014. Polibenzimidazol (PBI) lifleri. TMMOB Tekstil Mühendisleri Odası, Tekstil ve Mühendis dergisi, 21, (96), 52-67s.

Kalaycı, E., Avinc, O., Yavas A., 2015a. Yüksek Performanslı Lifler: PIPD, poli(piridobisimidazol) Lifleri, CBÜ Fen Bil. Dergisi,12, (1), 93-101s

Kalaycı E., Avinç O., Yavaş A., 2015b. Yüksek Performanslı PBO (poli-pfenilenbenzobisoksazol) Lifleri. Tekstil ve Mühendis Dergisi, 22, (98), 63-83s.

Karakan, G., (2009), Teknik Tekstillerin Koruyucu Yapılarda Kullanımı, Tekstil Teknolojileri Elektronik Dergisi, Cilt:3 Sayı:1, 65-70s.

Karbalaıe, M., Yazdanırad, M. ve Mırhabıbı, A., 2011. High Performance Dyneema® Fiber Laminate For İmpact Resistance/ Macro Structural Composites. Journal of Thermoplastic Composite Materials, Ariadana Energy Group, Tehran, Iran Department of Chemical Engineering, Sharif University of Technology (SUT), Tehran, Iran School of Metallurgy &

Materials Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran, 25, 4, 404s.

Kim, J.S., Reneker, D.H., 1999. Polybenzimidazole Nanofiber Produced by Electrospinning. Polymer Engineering & Science, 39, (5), 849-854s.

Kitagawa, T., Yabuki, K., Wright, A.C., Young, R.J., 2014. An Investigation Into The Relationship Between Processing, Structure And Properties For High-Modulus PBO Fibres: Part 3: Analysis Of Fibre Microstructure Using Transmission Electron Microscopy. Journal Of Materials Science, 49, 6467-6474s.

Korkmaz, M., 2009, Aramid Kumaş Özelliklerine Bağlı İplik Çekme (Yarn Pull-Out) Testi ile Çok Katlı Dikişli Yapıların Balistik Performansının Deneysel Belirlenmesi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, Kayseri, 208s.

Kuroki, T., Tanaka, Y., Hokudoh, T., Yabuki, K., 1997. Heat Resistance Properties of Poly (P-Phenylene-2,6- Benzobisoxazole) Fiber. Toyobo Research Institute, Toyobo Co., Ltd, Katata Ohtsu Shiga, Japan, 1031-1036s.

Lammers, M., 1998. PIPD Rigid-Rod Polymer Fibers and Films: Structure Formation and Mechanical Properties. Abe Books: Zurich, 137-141s.

Lammers, M., Klop, E.A., Northolt, M.G., Sikkema, D.J., 1998. Mechanical Properties and Structural Transitions in The New Rigid-Rod Polymer Fibre PIPD ('M5') During The Manufacturing Process. Polymer, 39, 5999-6005s.

Leal, A.A., Deitzel, J.M., Gillespie, Jr, J.W., 2007. Assessment Of Compressive Properties Of High Performance Organic Fibers. Composites Science And Technology; 67, 2786-2794s.

Lee, B.L., Walsh, T.F., Won, S.T., Patts, H.M., Song, J.W. ve Mayer, A.H., 2001. Penetration Failure Mechanisms of Armor-Grade Fiber Composites under Impact. Journal of Composite Materials, 35,18, 1605-1633s

Lesser, A.J., 2005. Drawing Nylon 6, 6 Fibers in High Pressure CO2, DTIC Document, 27s.

Lewin, M., 2006. Handbook of Fiber Chemistry. CRC Press, U.S.A. New York, 3, 1056s.

Lim, C.T., Tan, V.B.C., ve Cheong, C.H. 2002. Perforation of high strength double-ply fabric system by varying shaped projectiles. International Journal of Impact Engineering, 27,6, 577-591s.

Lin, H., Huang, Y.D., Wang, F., 2008, Synthesis And Properties Of Poly [P-(2, 5-Dihydroxy)-Phenylenebenzobisoxazole] Fiber. International Journal Of Molecular Sciences,; 9, (11), 2159-2168.

Marissen R., 2011. "Design with Ultra Strong Polyethylene Fibers". Materials Sciences and Applications, Scientific Research, DSM Dyneema, Urmond, The Netherlands; Delft University of Technology, Faculty of Aerospace Engineering, Delft, The Netherlands, 2 , 319-320s.

Mather R.R., Wardman, R.H., 2011. The Chemistry of Textile Fibres. The Royal Society of Chemistry, Cambridge, 439s.

Mckenna, H.A.; Hearle, J.W.; O'Hear, N., 2004. Handbook Of Fibre Rope Technology. The Textile Institute, CRC Press, Washington DC, 416s.

Memiş, Ö. 2009. Balistik Amaçlı Fiber Takviyeli Polimer Matriksli Kompozitler. Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalürji ve Malzeme Bilimi Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Kocaeli. 104s.

Mittal, V., 2011. High Performance Polymers And Engineering Plastics. John Wiley & Sons, New Jersey, 452s.

Montes-Moran, M.A., Davies, R.J., Riekel, C., Young, R.J., 2002. Deformation Studies Of Single Rigid-Rod PolymerBased Fibres Part 1: Determination Of Crystal Modulus. Polymer, 43, 5219-5226s.

Montgomery, T.G., Grady P.L., ve Tomasino C., 1982. Effects of projectile geometry on the performance of ballistic fabrics. Textile Research Journal 52,7,: 442-450s.

Mortensen, A., 2006. Concise Encyclopedia Of Composite Materials. Elsevier, Switzerland, (2), 1050s.

Mukhopadhyay , S.K., 1993. High Performance Fibres. Textile Progress, The Textile Institute, Manchester, 25, (3/4),85s.

Naik, N.K., Shrirao, P., Reddy, B.C.K., 2006, Ballistic impact behaviour of woven fabric composites: Formulation, International Journal of Impact Engineering 32,1521–1552s.

National Research Council of The National Academies. 2011. Committee on Opportunities in Protection Materials Science and Technology for Future Army Applications. National Materials Advisory Board and Board on Army Science and Technology, Division on Engineering and Physical Sciences The National Research councıl Of The National Academies, The National Academies Press, Washington D.C., U.S.A.

NIJ Standard -0101.04,2002 Ballistic Resistance of Personal Body Armor Standard, www.ojp.usdoj.gov/nij , National Institute of Justice, Office of Science and Technology, Washington,Erişim tarihi :10 Ekim 2019

NIJ Standard-01.01.06,2008, Ballistic Resistance of Personal Body Armor Standard, www.ojp.usdoj.gov/nij, National Institute of Justice, Office of Science and Technology, Washington, Erişim Tarihi:10 Ekim 2019

Northolt, M., Sikkema, D., Zegers, H., Klop, E., 2002. PIPD, A New High-Modulus and High-Strength Polymer Fibre With Exceptional Fire Protection Properties. Fire and Materials, 26, 169-172 s.

Oğlakçıoğlu N., Ertekin G., Marmaralı A., 2014. Yüksek Performanslı ipliklerden Üretilen Örme Kumaşların Mekanik Etkilere Karşı Dayanımlarının incelenmesi, Tekstil ve Mühendis dergisi, 21, (95),1-8s.

O'Neil J.M., 2006. Factors Contributing to the Degradation of Poly (P-Phenylene Benzobisoxazole)(PBO) Fibers under Elevated Temperature and Humidity Conditions. Texas A&M University,44s.

Özdoğan E., Demir A., Seventekin N., 2006. Nanoteknoloji Ve Tekstil Uygulamalari, Tekstil ve Konfeksiyon, 16, (3), 160-168.

Özek, T., 2005. Hafif silahlara karşı zırh yapımında kullanılan polimer matrisli kompozitlerin mekaniksel özelliklerinin. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar, 113s.

Özer, S., 2004, Balistik Koruma Amacıyla Kullanılan Malzemeler ve bu Malzemelerin Balistik Deformasyonuna Etki Eden Faktörler, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 118s.

Peijs, A. A. J. M., 1993. High-performance polyethylene fibres in structural composites?: promises, reality and applications in hybrid composites, Eindhoven, Technische Universiteit Eindhoven, Cıp-Data Koninklijke Bibliotheek, Den Haag, 2, (4), 224s.

Pan N., Sun, G., 2011, Functional Textiles for Improved Performance, Protection and Health, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 552s.

Powers, E., Serad, G., 1986. History and Development of Polybenzimidazoles, High Performance Polymers: Their Origin and Development. Springer, 355-373s.

Pradhan S., Pandey P., Mohanty S. ve Nayak S.K., 2016. Insight on the Chemistry of Epoxy and Its Curing for Coating Applications: A Detailed Investigation and Future Perspectives. Polymer-Plastıcs Technology And Engıneerıng, 55, 8, 862–877s.

Prosser, R A., Cohen ,S.H., ve Segars, R.A.. 2000. Heat as a factor in the penetration of cloth ballistic panels by 0.22 caliber projectiles. Textile Research Journal 70,8, 709-722s.

Quanjin M., Rejab M.R.M., Idris M.S., Zhang B., Kumar N. M., 2019 Filament Winding Technique: SWOT Analysis and Applied Favorable Factors. SCIREA Journal of Mechanical Engineering, 3, 1, 15-25s.

Raji M., Abdellaoui H. , Essabir H. , Kakou C.A., Bouhfid R., Qaiss A.E.K., 2018. Prediction of the cyclic durability of woven-hybrid composites. Durability

and Life Prediction in Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites, (DOI: 10.1016/B978-0-08-102290-0.00003-9), 27-62s.

Rao, Y., ve Farris R.J.. 2000. A Modeling and experimental study of the influence of twist on the mechanical properties of high-performance fiber yarns. Journal of Applied Polymer Science, 77,9, 1938-1949s.

Rice. K., 2011, Ballistic-Resistant Body Armor Selected Research Initiatives Body Armor Workshop, November 29, National Institute of Standards and Technology (NIST) Gaithersburg, Maryland

Rice, B., Quinzi, J., Lund, L., Ulreich, J., Shoup, M., 2014. Measurement of Young's Modulus and Damping of Fibers at Cryogenic Temperatures. Cryogenics, 63, 43-48s.

Risby, M.S., Wong, S.V., Hamouda, A.M. S., Khairul, A.R., ve Elsadig, M., 2008. Ballistic Performance of Coconut Shell Powder/Twaron Fabric against Non-armour Piercing Projectiles. Defense Science Journal, 58, 2, 248-263s..

Schueler, R., Joshi, SP. ve Schulte, K., 2001. Damage Detection In CFRP By Electrical Conductivity Mapping. Composites Science and Technology, 61, (6), 921-930s.

Scott, R.A., 2005. Textiles for Protection, CRC Press, Cambridge,754s

Shim, V.P.W., Tan, V.B.C., ve Tay, T.E. 1995. Modelling deformation and damage characteristics of woven fabric under small projectile impact. International Journal of Impact Engineering, 16,4, 585-605s.

Shockey, D.A., Elrich D.C, ve Simmons J.W.. 2001. Improved Barriers to Turbine Engine Fragments: Interim Report III, Office of Aviation Research Washington, D.C., Menlo Park, Calif,: SRI International, 94s

Shockey, D.A., Simons, J.W., ve Erlich, D.C., 1999. Improved Barriers to Turbine Engine Fragments: Interim Report I., Office of Aviation Research Menlo Park, Calif., SRI International, Washington, D.C., 40s.

Sikkema, D.J., Northolt, M.G., Pourdeyhimi, B., 2003. Assessment of New High Performance Fibers for Advanced Applications. MRS Bulletin, 28,(8), 579-584s.

Sirichaisit, J., Young, R.J., 1999. Tensile and Compressive Deformation of Polypyridobisimidazole (PIPD)- Based 'M5' Rigid-Rod Polymer Fibres. Polymer, UMIST/University of Manchester, Manchester, 40, (12), 3421-3431s.

Silva, F da L., Lavoratti, A., Pereira, L.M., Dias, R.R., Amico, S.C., Zattera, A.J., 2019. Development of multilaminar composites for vehicular ballistic protection using ultra-high molecular weight polyethylene laminates and aramid fabrics, Journal Of Composıte Materıals, 0(0), 1–10s

So, C., Bennett, J., Sirichaisit, J., Young, R., 2003.Compressive Behaviour of Rigid Rod Polymer Fibres and Their Adhesion to Composite Matrixes. Plastics, Rubber and Composites. 32, 5, 199-205s.

Sözen, E., Gündüz,G.,İmren, E., 2016. Balistik Panel Ve Koruyucu Zırh Üretiminde Kullanılan Lif ve Kompozit Malzemeler, Bartın Üniversitesi Bartın Orman fakültesi dergisi, Bartın, 18,2, 194-204s.

Starratt, D., Sanders T., Cepus E., Poursartip A., ve Vaziri R.., 2000. Efficient method for continuous measurement of projectile motion in ballistic impact experiments. International Journal of Impact Engineering 24(2): 155-170s.

Tan, V.B.C., Lim, C.T., ve Cheong, C.H., 2003. Perforation of highstrength fabric by projectiles of different geometry. International Journal of Impact Engineering, 28,2, 207-222s.

Tan, V.B.C., Shim, V.P.W.,ve Zeng, X., 2005. Modelling crimp in woven fabrics subjected to ballistic impact. International Journal of Impact Engineering 32,1-4, 561-574s.

Temiz, S., 2005, Balistik Kumaş ve Test Yöntemleri Üzerine Bir Araştırma, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir, 107s.

Turan, M., 2007, Tabakalı Kompozit Malzemelerde Yüksek Hızlı Darbe Hasarı, Mühendis ve Makina, Cilt: 48, Sayı: 575, 3- 8s.

Ulcay, Y., Akyol, M., Gemci, R., 2002. Polimer Esaslı Lif Takviyeli Kompozit Malzemelerin Arabirim Mukavemeti Üzerine Farklı Kür Metodlarının Etkisinin İncelenmesi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Mimarlık fakültesi, 7,1, 93-116s.

Uslu M., 2007, Docol 22MnB5 Çeliğinin Balistik Özelliklerinin İncelenmesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Malzeme ve İmalat programı, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul,146s.

Vogel, H., Marvel, C., 1961. Polybenzimidazoles. New Thermally Stable Polymers, Journal of Polymer Science, 50, (154), 511-539s.

Vural, M. Üretim Yöntemleri Ders Notu. İ.T.Ü. Makina Fakültesi, Erişim Adresi: https://web.itu.edu.tr/gulmezt/IMAL%20USULLERI/ch13-Plastik%20isleme.pdf, İstanbul, Erişim tarihi:05 Şubat 2020

Wagner, H.D., 2019. Composite Materials. LAB, https://www.weizmann.ac.il/materials/Wagner/research-activities/composite-materials, Erişim tarihi: 25 Ocak 2020

Wang, K.Y.,Chung, Tai-S., Qin, Jian-j., 2007. Polybenzimidazole (PBI) Nano Filtration Hallow Fiber Membranes Applied in Forward Osmosis Process. Journal of Membrane Science, 300, 6-12s.

Warheit, D.B.; Webb, T.R.; Reed, K.L., 2007. Pulmonary Toxicity Screening Studies In Male Rats With M5 Respirable Fibers And Particulates. Inhalation Toxicology, 19, 951-963s.

Werff, H., Heisserer, U., 2016. High performance ballistic fibres: Ultra-High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE). Advanced Fibrous Composite Materials for Ballistic Protection, DSM Ahead Material Sciences R&D, DSM Dyneema, Geleen, The Netherlands, 1, (3), 46s.

Wilde, A.F.,. Roylance, D.K, ve Rogers, J.M.. 1973., Photographic investigation of high-speed missile impact upon nylon fabric-1: Energy absorption and cone radial velocity in fabric. Textile Research Journal, 43(12), 753-761s

Wilusz, E., 2008. Military Textiles. Woodhead Publishing Limited, Cambrid ,384s.

Wu, Q., Pan, D., A , 2002. New Cellulose Based Carbon Fiber From a Lyocell Precursor. Textile Research Journal, 72(5), 405-410s.

Yalçın, E.B., 2012. Farklı Kumaş ve Farklı Yöntemlerle Üretilmiş CTP Kompozitlerin Balistik Davranışlarının İncelenmesi. T.C. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 137s.

Yaman, N., Ökmen, T., Seventekin, N., 2007. Karbon Liflerinin Özellikleri ve Kullanım Olanakları. Tekstil ve Konfeksiyon dergisi, 2/2007, 90-95s.

Yang, C., Tran, P., Ngo, T., Mendis, P., Humphries, W., 2014. Effect of Textile Architecture on Energy Absorption of Woven Fabrics Subjected to Ballistic Impact. Applied Mechanics and Materials, Trans Tech Publications, Switzerland, 553, 757-762s,

Yılmaz, H., 2012, Üç Fazlı Elyaf Tabakalı Karma Kompozit Yapının Balistik Özelliklerinin incelenmesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta, 183s.

Yumak, N., Pekbey, Y., Aslantaş, K., 2013. Zırh Tasarımında Kullanılan Kompozit Malzemelerin Deformasyon Karakteristiğinin Araştırılması. Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 10, (4), 1-21.

Zeng, X.S., Shim, V.P.W., and Tan, V.B.C.,. 2005. Influence of boundary conditions on the ballistic performance of high-strength fabric targets. International Journal of Impact Engineering, 32,1-4, 631-642s.

Zhang, T., Li, G., Jin, J. J., 2007. Research and Application of New High Performance Fiber M5. Journal of Materials Review, 009.

Zhou Y., Yang W., Xia Y. ve Mallick P.K., 2003. An Experimental Study On The Tensile Behavior of a Unidirectional Carbon Fiber Reinforced Aluminum

Composite at Different Strain Rates. Materials Science and Engineering, Elsevier B.V. , 362, 112-117s.

Zhu, R., ve Young, R., 2006. Thermal Performance Garments Comprising An Outer Shell Fabric Of PIPD And Aramid Fibers. İnternational publication number WO 2007/073539 Al.

ÖZGEÇMİŞ

İskenderun/Hatay'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Hatay İskenderun demir-çelik ilköğretim okulunda tamamladıktan sonra lise öğrenimini Adana Ramazan Atıl lisesinde tamamladı. 2011 yılında Afyon Kocatepe üniversitesinde Malzeme Bilimi ve Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı ve 2016 yılında lisans eğitimini tamamladı. 2017 yılında Çukurova Universitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı.