



TEKSTİL VE MÜHENDİS
(Journal of Textiles and Engineer)



<http://www.tekstilvemuhendis.org.tr>

Keskin, Sivri Uçlu Cisimlere Ve Darbelere Karşı Koruma Performansı Yüksek Tekstil Yapıları

Textile Structures with High Protection Performance Against Knife, Spike And Impact

Ozan ONUKTAV*, Utku VAROL, Sinem KEMANECİ, Bekir BOYACI

Sun Tekstil Ar-Ge Merkezi, Torbalı, İzmir, Türkiye

Online Erişime Açıldığı Tarih (Available online):30 Eylül 2021 (30 September 2021)

Bu makaleye atıf yapmak için (To cite this article):





Ozan ONUKTAV*, Utku VAROL, Sinem KEMANECİ, Bekir BOYACI (2021): Keskin, Sivri Uçlu Cisimlere Ve Darbelere Karşı Koruma Performansı Yüksek Tekstil Yapıları, Tekstil ve Mühendis, 28: 123, 233-245.

For online version of the article: <https://doi.org/10.7216/1300759920212812308>



Derleme Makale/ Review Article

**KESKİN, SİVRİ UÇLU CİSİMLERE VE DARBELERE KARŞI KORUMA
PERFORMANSI YÜKSEK TEKSTİL YAPILARI**

Ozan ONUKTAV* 
Utku VAROL 
Sinem KEMANECİ 
Bekir BOYACI 

Sun Tekstil Ar-Ge Merkezi, Torbalı, İzmir, Türkiye

Gönderilme Tarihi / Received: 22.09.2020

Kabul Tarihi / Accepted: 21.06.2021

ÖZET: Yüksek performanslı liflerin, teknolojilerinin ve üretim yöntemlerinin gelişmesiyle birlikte, bu malzemelerin mühendislik uygulamalarında ve koruyucu ekipmanlarda kullanımı her geçen gün artmaktadır. Özellikle askeriye ve güvenlik güçleri tarafından kullanılan yumuşak vücut zırhları, yüksek performanslı malzemelerin katkısıyla gün geçtikçe daha sağlam ve daha hafif hale getirilmektedir. Söz konusu malzemelerin tekstil takviyeli yumuşak vücut zırhlarında kullanımıyla, bıçaklanma ve delinme gibi mekanik etkilere karşı dayanıklı ürünler geliştirilebilirken aynı zamanda kişinin ergonomik konforuna uygun, hafif ve esnek yapıdaki tasarımlar da yapılabilir. Bu doğrultuda, bıçak ve sivri nesnelerin koruyucu yapılar üzerindeki etki mekanizması, bu etkilerin belirlenmesinde kullanılan test ve standartlar, mekanik etkilere dayanıklı tekstil yapıları, tekstil takviyeli kompozit yapılar, kumaşlara uygulanan emdirme, kaplama ve laminasyon işlemleri ile oluşturulmuş özel yapılar hakkındaki literatür incelenmiş ve bu çalışma kapsamında derlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Koruyucu tekstiller, yumuşak vücut zırhları, yüksek performanslı lifler, kompozit, kaplamalı kumaş, laminasyonlu kumaş, bıçak direnci, darbe direnci

**TEXTILE STRUCTURES WITH HIGH PROTECTION PERFORMANCE
AGAINST KNIFE, SPIKE AND IMPACT**

ABSTRACT: With the current development of high performance fibers, their technologies and production methods, the use of these materials in engineering applications and protective equipments are increasing recently. Soft body armors; especially used by the military and security forces, are becoming stronger and lighter day by day with the contribution of these high performance materials. With the use of these high performance fibers in textile reinforced soft body armors, products that are resistant to mechanical effects such as stabbing and puncture can be developed. At the same time, light and flexible designs can be made in accordance with the ergonomic comfort of the person. In this review, the literature was examined about the mechanisms of knives and sharp objects in protective textiles, tests and standards used to determine the performance of these structures, textiles that resistant to mechanical effects, textile reinforced composite structures, impregnated, coated and laminated textiles and gathered together within the scope of the study.

Keywords: Protective textiles, soft body armor, high performance fibers, composite, coated fabric, laminated fabric, stab resistance, impact resistance

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: ozan.onuktav@suntekstil.com.tr

DOI: <https://doi.org/10.7216/1300759920212812308> www.tekstilvemuhendis.org.tr

1. GİRİŞ

İnsanlık tarihinde en eski mızrağın MÖ. 40.000'lerde kullanıldığı bilinmektedir [1]. Dolayısıyla savunma araçlarının da en az o kadar uzun bir tarihi olduğu söylenebilir. Kalkan, en eski savunma araçlarından biridir. Zamanla ok, mızrak, kılıç, topuz gibi silahların geliştirilmesi, daha güçlü ekipmanların ortaya çıkmasına neden olmuştur. Saldırı araçları geliştikçe savunma araçları da bunlardan korunmayı sağlayacak şekilde güçlendirilmiştir. Eski zamanlardan beri insanlık sadece giyim için değil, aynı zamanda bedensel koruma için de tekstil ve tekstil içerikli malzemeleri kullanmıştır. Antik Yunan kalkanlarında deri, eski Japonya'da katmanlı ipek, Orta Çağ'da zincir zırh takımları, insanları dış etmen ve silahlardan korumak için kullanılmıştır [2,3]. İnkalar iki deri parçasının arasına sıkıştırdıkları pamuk ile neredeyse İspanyolların kullandığı çelik zırh plakalar kadar koruma sağlamaktaydı. Ayrıca bu zırhlar çelik plakalardan daha hafif, daha esnek ve daha konforlu idi [1]. Bu yapılar birinci nesil olarak tanımlanabilecek ilk vücut zırhlarıdır. İkinci nesil vücut zırhları, yüksek koruyuculuk özelliklerinin yanında hafiflik ve kullanım kolaylığı da sağlanabilmesi amacıyla sentetik liflerden geliştirilmişlerdir. Ancak günümüzden binlerce yıl önce bile hafif ve yumuşak tekstil malzemelerinden zırhların kullanıldığı görülmektedir [4,5]. Bu durum, o zamanlarda bile ergono-mik birtakım sebeplerin insanlar tarafından dikkate alındığını göstermektedir. İkinci Dünya Savaşı sırasında geliştirilen ikinci nesil zırhların genellikle naylon içerikli oldukları görülmektedir. Bu zırhlar öncekilere kıyasla daha iyi performans göstermiş olsalar da ateşli silahlara karşı yeterli koruma özellikleri gösterememişlerdir. Ayrıca bu zırhların son derece hantal oldukları belirtilmektedir [4]. Üçüncü nesil vücut zırhları ise 1960'larda DuPont firmasının yüksek performanslı para-aramid liflerini geliştirmesi ve bu liflerin vücut zırhlarında kullanılması ile ortaya çıkmıştır [4,5]. Bu yüksek performanslı malzemeler çelik kadar yüksek dayanım özellikleri göstermelerinin yanında, son derece yumuşak ve hafif olmaları nedeniyle insanların binlerce yıldır üstesinden gelemedikleri ağırlık, hantallık ve termofizyo-lojik ve ergonomik bazı kaygıların da çözülebilmelerinin yolunu açmıştır.

Vücut zırhları, insan vücudunu mermilerin veya keskin nesnelere ile yapılan saldırıların neden olduğu olası yaralanmalardan koruyan giysi ya da aksesuarlardır. Günümüzde kullanılan modern zırhlar, yumuşak vücut zırhları ve sert vücut zırhları olarak kategorize edilmektedir [3]. Yumuşak vücut zırhları, yüksek performanslı lifler kullanılarak üretilen kumaşlardan (dokuma, örme, dokusuz yüzey), yüksek performanslı elyaf takviyeli hafif ve esnek kompozitlerden üretilir ve birden fazla katmandan oluşabilir. Yumuşak vücut zırhları hafif ve esnek yapıda olduklarından giyen kişi tarafından kolayca taşınabilir ve nispeten hareket kolaylığı sağlarlar. Bu zırhlar, gözenekli ve boşluklu yapılarda üretilebileceği için giyen kişinin termofizyolojik yükünü hafifletirler. Sert vücut zırhları ise rijit kompozit yapılardan, seramik veya metal plakalardan oluşmaktadır. Yüksek ağırlıkları nedeniyle giyen kişinin konforsuz hissetmesine neden olurlar. Sert ve ağır yapıları sebebiyle kullanım sırasında hareket kısıtları

ortaya çıkabilir. Günümüzde balistik bir darbeden veya keskin bir nesneden korunmaya yönelik vücut zırhları geliştirilirken, hafif ancak dayanıklı malzemeler kullanılması hedeflenmektedir. Bu malzemelerin kullanılmasıyla amaçlanan, gerekli performans özelliklerinden ödün verilmeden, hareket kabiliyeti ve ısıl konfor özellikleri yüksek olan daha hafif ve düşük maliyetli zırhların üretilmesidir. Yüksek performanslı sentetik liflerin icadı ve bu liflerin koruyucu zırh yapımında kullanılması da yumuşak vücut zırhlarının gelişimini hızlandırmıştır [4,5]. Koruyucu zırh ile ilgili mevcut çalışmalar çoğunlukla mermilere karşı korumaya yönelik olmasına rağmen, son on yılda darbeye ve keskin nesnelere karşı koruma alanlarındaki çalışmalara da önem verildiği görülmektedir [6]. Darbe ve keskin cisimlere karşı koruma amacıyla geliştirilen zırhlar genellikle ağır ve sert olmalarına rağmen, güncel eğilim bu zırhları daha hafif ve esnek malzemelerden üretmek maliyet avantajı ve kullanım kolaylığı sağlayabilmektir.

Bu çalışmada, bıçak ve darbe direnci yüksek yumuşak vücut zırhları konusunda hazırlanan güncel literatür ve patentler incelenmiş, piyasadaki ürünler ve bu ürünlerin yapımında kullanılan dokuma ve örme kumaş yapıları, dokusuz yüzeyler ve keçeler, kaplama metotları, Shear Thickening Fluid (STF) takviyeli yapılar, kompozit malzemeler, para-aramid, UHMWPE (ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen), Polibenzimidazol (PBI) gibi yüksek performanslı lifler vb. malzemeler araştırılmıştır. Yüksek performanslı liflerden üretilen zırhların bıçak ve darbe gibi etkilere maruz kaldığındaki davranışları, bu zırhların koruma mekanizmaları, bu alanda yapılan deneysel ve teorik çalışmalar ve bu alanda kullanılan standartlar ve test metotları çalışma kapsamında derlenmiştir. Mermi ya da şarapnel gibi çok yüksek hızla hareket eden tehditler, yumuşak olmayan ve tekstil malzemesi içermeyen zırhlar çalışmanın kapsamı dışında bırakılmıştır. Çalışmada yumuşak vücut zırhlarının gelişimi, güncel durumu ve performans değerlendirme kriterleri ortaya konmuş, böylece gelecekte yapılacak deneysel çalışmalara ışık tutması amaçlanmıştır.

2. YUMUŞAK VÜCUT ZIRHLARININ KORUMA MEKANİZMASI

İnsanlık tarihinde binlerce yıldır dış etmenlerden korunma amacıyla hayvan derisi, kumaş, metal zırh gibi malzemelerin kullanıldığı bilinmektedir. Bu zırhlarda dışarıdan gelebilecek farklı tehditlere ve beklenen koruma seviyelerine göre yumuşak veya rijit özelliklerde farklı malzemeler tercih edilmiştir. Günümüzde kullanılan yumuşak vücut zırhlarının da koruma mekanizması, maruz kalacağı mekanik etkilere ve kullanım yerine göre belirlenmektedir. Bu çalışmada konu edilen mekanik etkiler; bıçaklanma, delinme, keskin veya sivri köşeli obje ya da blok fırlatılması ile oluşan, mermi kaynaklı olmayan darbeleri tanımlamaktadır. Koruyucu zırhların balistik testleri incelendiğinde mermi penetrasyonu ve keskin bir nesne penetrasyonu arasında büyük farklar olduğu görülmektedir. Mermi darbesi söz konusu olduğunda, kütle düşük ancak hız oldukça yüksektir. Söz konusu bıçak gibi sivri bir nesne ise, kütle mermiye kıyasla daha büyük ancak

hız oldukça düşüktür. Mermi ve bıçak geometrisi arasın-daki farklar da zırhların koruma mekanizmaları arasında büyük farklar ortaya çıkarmaktadır. Mermilerin ucu sivri olmadığından darbe sırasında deforme olarak kuvvetin yayıldığı alanın geniş-lediği bunun aksine sivri uçlu nesnelere tek bir noktaya oldukça büyük bir kuvvet uygulayarak penetrasyon sağladığı bilinmek-tedir [7]. Söz konusu tehditlerin etki mekanizmaları farklı olduğundan, bu etkilere karşı koruma mekanizmaları da farklılık göstermektedir. Mermi için koruyucu olan bir zırh, bıçak darbe-lerine karşı etkisiz olabilmektedir.

Wang ve arkadaşları (2007), çalışmalarında dokuma kumaşa uygulanan bıçak darbesi mekanizmasının üç adımdan oluştuğunu belirtmişlerdir. İlk aşamada, kumaş direncinin bıçağın geometrik şekline, bıçaklama açısına, zırh ile bıçak arasındaki sürtünmeye ve zırhtaki basınç dağılımına bağlı olduğunu açıklamışlardır. Bıçak direncine sahip zırhların, bu ilk aşamada bıçak enerjisini absorbe etmesi gerektiğini vurgulamışlardır. İkinci aşamada bıçağın, zırhın daha derinine nüfuz ettiğini ve zırhı oluşturan malzemelerdeki gerilimlerin arttığını, gerilen malzemelerin daha kolay tahrip olduğunu, ipliklerin çekilmeye veya kesilmeye başladığını ve arka yüze doğru çıkıntı oluşturduklarını belirtmişlerdir. Bu aşamadaki penetrasyonun bıçağın uç yapısına, bıçağın keskinliğine ve zırh malzemesinin mekanik özelliklerine bağlı olduğunu vurgulanmıştır. Üçüncü aşamada ise zırhın tamamen delindiğini ya da kesildiğini ve bıçağın, zırhı giyen kişinin vücuduna saplanmaya başladığı belirtilmiştir [8]. Tien ve arkadaşları (2011), yaptıkları çalışmada konfor özellikleri iyileştirilmiş hafif zırhlar için para-aramid, bazalt ve çelik ipliklerini, pamuk lifleri ile kaplayarak elde ettikleri hibrit iplikler ile üretilen dokuma kumaşların bıçak direnci performanslarını değerlendirmişlerdir. Sonuçta bıçak direncine etki eden temel parametrenin kumaş yoğunluğu olduğu, penetrasyon derinliğine etki eden en önemli parametrelerin ise katman sayısı ve kalınlık olduğu tespit edilmiştir [9]. Hejazi ve arkadaşları (2016), çalışmalarında dikey bıçak darbelerinin kumaş üzerindeki etkilerinin tahminlenmesi amacıyla analitik bir model geliştirmişler ve bu model ile pamuk, poliester ve poliamid kumaşlar üzerinde yapılan testleri karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak söz konusu model sayesinde oldukça iyi tahminlemeler yapılabileceği anlaşılmıştır. Geliştirilen modele göre giysinin bıçak direncinin, bıçağın geometrik parametre-lerine ve kumaşın mekanik özelliklerine bağlı olduğu ve bıçak ucunun yüzey alanının, kumaşın katman sayısının ve kumaşın elastik modülünün ilk penetrasyon için gerekli enerjiyi belirlediği tespit edilmiştir. Ayrıca yapılan testlerde çok yüksek hızlar-daki bıçak darbeleri söz konusu olduğunda bıçak ucu geomet-risinin etkisinin azaldığı görülmüştür [10]. Basak ve arkadaşları (2018), çalışmalarında yüksek performanslı liflerden dokunmuş kurşungeçirmez bir yeleşin iyi bir bıçak direncinin olamaya-cağını belirtmişlerdir. Mermi darbesine dayanıklı giysilerin esnek yapıda olduklarını ve çok sıkı dokunmadıklarından dolayı bıçak gibi keskin nesnelere tarafından kolayca delinebileceğini aktarmışlardır. Yüksek bıçak direnci olan bir dokuma giysinin çok sık dokunduğunu, bu yapının da sivri uçlu olan bıçaklara karşı bir bariyer görevi gördüğünü belirtmişlerdir [11]. Tien ve arkadaşları

(2010), çalışmalarında kullanılan ipliğin kumaş yapı-sında meydana getirdiği değişikliklerin bıçak direncine etkisi incelenmiştir. aramid-pamuk karışım ve %100 aramid iplikler ile üretilen iki farklı yapı incelendiğinde, kullanılan iplikler arasındaki sertlik farkından kaynaklı olarak %100 aramid içerikli kumaş yapısının görece boşluklu yapıda olduğu, karışım iplikler ile üretilen kumaşın ise daha sık yapıda olduğu gözlenmiştir. Yapılan testlerde, karışım iplikler ile üretilen daha sık ve kapalı olan yapının, bıçak darbesi kaynaklı delinme kuvvetine karşı daha iyi koruma sağladığı gözlenmiştir [12]. Aliverdipour ve arkadaşları (2019), çalışmalarında çeşitli geometrilere sahip keskin nesnelere kumaşlara verdikleri zararları incelemişlerdir. Bu amaçla beş farklı keskin nesne ve farklı malzemelerden üretilmiş kumaş yapıları ile testler gerçekleştirilmiştir. Testler sonrasında keskin nesnelere nüfuz etme kuvveti, derinliği ve enerjisi değerlendirilmiştir. Sonuçlar keskin nesnenin bıçaklama parametreleri üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Kullanılan nesnelere arasından keskin bıçakların yapıyı kolayca kesebildiği, sivri uçlu bıçakların tek bir noktaya çok fazla kuvvet uyguladığı, sivri olmayan bıçakların ise kuvveti daha geniş bir yüzeye yaydığı ve kumaşları esnettiği görülmüştür. Esnek kumaşların darbe yönünde kolayca esnediği ve bu nedenle keskin nesnelere yüksek hızlarda refakat malzemesi içerisinde daha derine nüfuz ettiği gözlenmiştir [13]. Literatürde yer alan bazı çalışmalarda, katmanlarda kullanılan malzemenin aynı olduğu yapılarda katman sayısı arttıkça bıçak-kumaş arasın-daki sürtünmenin arttığı ve penetrasyon derinliğinin azaldığı belirtilmektedir [14]. Chen (2012), ve Wang (2015), çalışmaları-da, vücut zırhlarında kullanılan çift eksenli ve çok eksenli dokuma kumaşların darbe enerjisini absorbe etme performans-larını araştırmışlardır. Standart çift eksenli dokuma kumaşların gelen darbeyi iki eksene yaydığı ve darbe sonucu kumaşta piramit şeklinde derin bir yapı oluştuğu gözlenirken, çok eksenli yapılarda darbe daha fazla eksene yayılarak daireye yakın bir yapı oluşmaktadır. Sonuç olarak çok eksenli yapıların darbe enerjisini farklı eksenlere dağıtarak darbeyi daha iyi absorbe ettikleri belirtilmiştir [15,16]. Erlich ve arkadaşları (2003), kesici cismin penetrasyonu sırasında kumaş deformasyonunun ve kop-manın gelişim mekanizmasının detaylarını kavramak için bir yarı statik penetrasyon test cihazı tasarlamışlar ve çeşitli testler ger-çekleştirmişlerdir. Sonuçlar, atılan cismin etkisiyle oluşan kumaş tepkisinin fizik tabanlı bir hesaplama modelinin geliştirilmesinde kullanılmıştır. Oluşturulan bu model sayesinde, farklı kopma mekanizmalarının oluştuğu koşullar, yük-darbe eğrisi ve emilen enerji üzerindeki etkilerin belirlenebileceğini aktarmışlardır [17].

İncelenen çalışmalar göstermektedir ki, sivri uçlu, keskin ve pürüzsüz bıçakların penetrasyon enerjisi ve penetrasyon derinliği oldukça yüksektir. Yukarıda tanımlanan nesnelere kaynaklı darbeye maruz kalacak yapılarda, yüksek performanslı malzeme-ler ile üretilmiş, sık yapı ve olabildiğince kapalı yüzeylere sahip kumaşların kullanılması daha uygundur. Koruyucu kumaş yapı-larının performanslarını artırmak için hibrit iplikler, farklı konst-rüksiyonlar veya kompozit kumaş yapıları kullanılabilir. Kat-manlı ve kalın yapılar kumaş-bıçak sürtünmesini artıracığından,

penetrasyon derinliğinin azaltılması için tercih edilebilir. Kullanılacak malzemelerin yüksek maliyetleri, test maliyetleri, test süreleri ve koruyuculuk faktörünü etkileyen birçok parametre göz önünde bulundurulduğunda, yeni kumaş yapılarının geliştirilmesi aşamasında bilgisayar tabanlı simülasyonların kullanılması ürün tasarım süreçlerini iyileştirecektir.

3. KULLANILAN YÜKSEK PERFORMANSLI LİFLER

Günümüzden yüz yıl öncesine kadar doğal lifler, yüksek performans gerektiren uygulamalarda da kullanılmaktaydı. 1900'lerin başlarında farklı sentetik liflerin geliştirilmesiyle, uygulama alanlarına yönelik lifler üretilmeye başlanmıştır. 1960'larda DuPont tarafından aramid esaslı yüksek performanslı liflerin geliştirilmesiyle bu alanda büyük bir adım atılmıştır [18]. Günümüzde çok iyi mekanik özelliklere sahip yüksek performanslı tekstil malzemeleri, koruyucu zırhların geliştirilmesindeki temel yapı taşlarıdır. Düşük yoğunluklu, yüksek mukavemetli, yüksek elastik modüle sahip ve termal stabilitesi yüksek olan para-aramid lifleri balistik uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır [18,19]. Ticari para-aramid lifi Kevlar®'a alternatif olarak ortaya çıkan PBO ve PBI lifleri yüksek mukavemet, yüksek kesilme dayanımı ve alev dayanımlarının yanı sıra yüksek aşınma dayanımına da sahiptirler [20,21]. Ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (Ultra high molecular weight polyethylene - UHMWPE) lifleri, diğer yüksek performanslı liflere göre çok daha düşük yoğunluğa sahip olduklarından, hafif zırhların yapısında tercih edilmektedirler. Ayrıca kesilme dirençleri diğer liflere göre yüksektir [3]. Vectran® (Liquid-Crystal Polymer - LCP) lifleri yüksek mukavemetli, kesilmeye karşı dirençli ve aşınma dayanımı yüksek liflerdir [22,23]. Karbon lifleri ile metal, seramik, cam gibi inorganik malzemelerden oluşan lifler çok yüksek mukavemet ve

balistik dayanıma sahip olmalarına karşın yüksek yoğunlukları sebebiyle oluşturulan yapının ağırlığını artırabilirler [5,23,24].

4. KESKİN, SİVRİ UÇLU CİSİMLER VE DARBELERE KARŞI KORUYUCU TEKSTİL YAPILARI

4.1. Dokuma yapılar

Dokuma kumaşlar diğer tekstil yapılarına daha stabil ve dengeli yapılarıdır. Yüksek atkı-çözümlü sıklıkları dolayısıyla yüksek yüzey yoğunlukları ve örtücülüğü sebebiyle balistik ve bıçak darbelerine karşı korumada sıklıkla kullanılmaktadırlar. Dokuma kumaşlarda darbe enerjisi emilimi söz konusu olduğunda, yüksek performanslı liflerin özelliklerinden tam olarak yararlanabilmek için, iplik içerisindeki lifler arası ve iplikler arası sürtünme yeterince yüksek olmalıdır [27]. Sun ve arkadaşları (2011), bezayağı ve dimi (2/1, 2/2) yapılarında filament poliester iplikler ile ürettikleri dokuma kumaşların sivri nesnelere ile delinme mekanizmalarını incelemişlerdir. Darbenin doğrudan atkı veya çözümlü ipliklerine isabet etmesi ile atkı-çözümlü ipliklerinin kesişim noktalarına isabet etmesi sonucunda oluşan direnç değerleri arasında kayda değer bir fark olmadığını tespit etmişlerdir. Sivri nesnenin, iplik çekilmeleri sonucunda kumaşta oluşan boşluklar arasından arka yüze kolayca geçtiğini belirtmişlerdir [28]. Bu durumun önüne geçilmesi adına araştırmacılar sivri nesne ve iplikler arasındaki sürtünme oranını artırmayı önermektedir. Sürtünmeyi artırmak için kumaş kalınlığını artırmanın ya da katmanlı yapılar kullanmanın efektif sonuçlar vereceği belirtilmiştir [10]. Özdemir ve Mert (2012), düşük atkı-çözümlü sıklığına sahip boşluklu yapıdaki dokuma kumaşların darbe dayanımlarını incelemeye yönelik çalışmalarında, bağlantı noktası sayısının

Tablo 1. Bazı Yüksek Performanslı Liflerin Fiziksel Özellikleri [18,20,23,25,26].

Lif Çeşidi	Kimyasal Yapı	Ticari Ürün	Yoğunluk(g/c m ³)	Çekme Mukavemeti (GPa)	Elastik Modülü (GPa)
Aramid	Para - aramid (Poli-p-fenilen-tereftalamid)	Kevlar® Twaron® Technora®	1,44 - 1,47	2,9 - 3,8	62 - 190
	Meta - aramid (Poli-m-fenilen izofitalamid)	Nomex® Kermel® Corex®	1,38	0,6	17
PBI	Polibenzimidazol	Celazole®	1,43	0,4	5,9
PBO	Poli-p-fenilenbenzobisoksazol	Zylon®	1,54 - 1,56	5,8	270
UHMWPE	Ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen	Dyneema® Spectra®	0,97	3,25	97 - 133
LCP	Sıvı kristal polimer	Vectran®	1,41	1,12 - 2,72	65 - 87
Karbon	Karbon	-	1,8 - 2	2,65 - 4,45	275 - 633
S-cam	Silisyum dioksit	-	2,48	4,8	74
Alüminyum	Alüminyum	-	2,7	0,14 - 0,62	70
Çelik	Çelik	-	7,8	0,34 - 2,1	210

azalması sonucu serbest durumda kalan ipliklerin esneyebildiğini, bu sayede gelen darbe enerjisinin daha iyi absorbe edilebildiğini söylemişlerdir. Bu sayede, boşluklu dokuma kumaşların çok katmanlı yapılarda ve kompozitler içerisinde kullanılabilirliği belirtilmiştir [29]. Millan ve arkadaşları (2018), çalışmalarında bezayağı konstrüksiyonunda, para-aramid kumaş ile termoplastik-aramid kompozit katmanları farklı kombinasyonlarda kullanarak hibrit yapılar elde etmişlerdir. Yapılan dikey bıçak darbe testleri karşılaştırıldığında "kompozit - para-aramid kumaş - kompozit" üç katlı yapının en iyi enerji absorpsiyonunu sağladığı ve bu nedenle en yüksek performansı gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır. Burada orta katmandaki işlemsiz aramid kumaş darbeyi sönümleyici ve bıçağın hızını yavaşlatıcı bir etki göstermektedir [30]. El Messiry ve Eltahan (2014), yaptıkları çalışmada hafif ve esnek koruyucu gövde zırhları için ürettikleri Kevlar29®, Vectran®, poliester içerikli, tek ve çok katlı, üç eksenli dokuma kumaşları, standart örme ve dokuma poliester kumaşlar ile karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak, düşük yoğunluğa ve yüksek elastik modüle sahip liflerin darbe absorpsiyon performanslarının daha iyi olduğunu tespit etmişlerdir. Çok katlı olarak kullanılan üç eksenli Vectran® dokuma kumaşların bezayağı dokuma kumaşlara göre darbe ve bıçak testlerinde daha iyi performans gösterdiğini belirtmişlerdir. Bu durumu ise üç eksenli kumaşların mekanik özelliklerinin ve yüzey stabilitesinin çok daha yüksek olması ile açıklamışlardır [31]. El Messiry (2014), yaptığı çalışmada farklı katmanlardan oluşan yapıların bıçak ve delinme direncinin incelenmesi amacıyla ipek, para-aramid ve poliester ipliklerle bezayağı dokuma kumaşlar ve üç eksenli dokuma kumaşlar üretmiştir. Üretilen kumaşları öncelikle tek katman olarak daha sonra farklı kombinasyonlar ile katmanlı yapılar oluşturularak test etmiştir. Tek katlı ipek bezayağı kumaşın bıçak ve delinme direncinin, test edilen diğer tek katlı kumaşlardan daha iyi olduğunu tespit etmiştir. Bu çıkarım ile ipek kumaş dış katmanda konumlanacak şekilde, poliester ve para-aramid kumaşlardan oluşan katmanlı yapıların performansını test etmiştir. Çalışma sonucunda altta beş katman ipek dokuma kumaş, altıncı katmanda üç eksenli para-aramid dokuma kumaş ve üstte beş katman ipek dokuma kumaş olacak şekilde üretilen yapının en iyi bıçak direncine sahip olduğunu belirtmiştir [22]. Runjun ve arkadaşları (2016), iplikler arası sürtünmeyi artırmak için bezayağı dokuma kumaş katmanları kullanmıştır. En alt katman aramid, ikinci katman yüksek mukavemetli poliester, en üstteki iki katman UHMWPE içerikli dört katmandan oluşan, darbe ve bıçak direnci çok yüksek hibrit bir yapı oluşturmuşlardır [32]. Birden fazla dokuma kumaş katmanının işleme yöntemi ile birleştirilmesi sonucu oluşturulan sıkı ve kapalı yekpare yapının delinmeye karşı direncinin yüksek olduğu belirtilmiştir [33]. Zhou ve arkadaşları (2014), çalışmalarında bezayağı dokuma kumaşlara belirli aralıklarda leno yöntemiyle iplikler dahil ederek güçlendirmişler ve darbe dayanımlarını incelemişlerdir. Leno yöntemi ile bezayağı dokuma kumaşa dahil edilen ipliklerin, atkı-çözümlü iplikler arası sürtünmeyi artırdığını tespit etmişlerdir. Böylece, normal bezayağı kumaşa göre daha iyi koruma sağlandığını belirtmişlerdir [34]. Çelik gibi metal malzemelerin bıçak direncinin yüksek olduğu bilinmektedir. Büküm verilmiş çelik teller kullanılarak veya ipliklerin üzerine çelik tel sarılarak üretilen dokuma kumaşların oldukça yüksek bıçak direncine sahip oldukları belirtilmiştir. Dokuma kumaşlarda atkı veya çözümlü ipliklerinin üzerine sarılı filament metal tellerin kumaşın bıçak

direncini artırdığı bilinmektedir. Daha kalın tellerin daha iyi bıçak direnci sağladığı ancak daha kalın çelik tellerin kumaş ağırlığını artırmak ve esnekliğini düşürmek gibi dezavantajları olduğu vurgulanmıştır [35]. Nasser ve arkadaşları (2019), yaptıkları çalışmada lifler arasındaki sürtünmeyi artırmak ve kumaşların delinme direncini iyileştirmek amacıyla bezayağı yapıda dokunmuş para-aramid kumaşlara fibrilasyon işlemi uygulayarak kumaş yüzeyindeki tüylülüğü artırmışlardır. Darbe testleri sonucunda, fibrilleştirilmiş kumaşların işlem görmemiş kumaşlara kıyasla çok daha yüksek darbe direnci performansı gösterdiği belirtilmiştir. Bıçak direnci testlerinde ise fibrilleştirilmiş kumaşların penetrasyon derinliğinin %230 azaldığı görülmüştür [36]. Li ve arkadaşları (2020), çalışmalarında, üç boyutlu dokuma kumaşlarda kat sayısı ve katların yerleşim açılarının bıçak direnci üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (HMWPE) iplikler ile üretilen üç boyutlu dokuma kumaşlarda bıçak direnci, düşük sayıda kumaş katıyla (6 kattan az) doğrusal korelasyon göstermiştir. Ancak bıçak direnci penetrasyon olmayana kadar kumaş katlarının artışı (16 kattan fazla) ile parabolik bir ilişki göstermiştir. Bunun yanında kumaş katlarıyla birlikte yerleşim açıları da arttırdığında bıçak direncinin iyileştiği belirtilmiştir [37]. Amirshirzad ve arkadaşları (2020), orta katmanında metal iplikler içeren üç katmanlı bir yapı geliştirmiş ve bu yapının delinme direnci performansını incelemişlerdir. Dış katman ve metal içerikli koruyucu katman dokuma, en iç katman ise konforlu bir giysi tasarlayabilmek için örme kumaştan üretilmiştir. Üç katmanlı yapının farklı sivri ve keskin cisimlere karşı çok iyi delinme direnci gösterdiği ve katmanlı yapının maksimum delinme kuvvetinin her katmanın delinme kuvvetinin toplamı olmadığı, metal takviyeli katmanın delinme kuvvetine benzer olduğu belirtilmiştir [38].

4.2. Örme yapılar

Atkı veya çözümlü örme teknikleri ile oluşturulabilen örme kumaşların, ilmek yapılarından dolayı boşluklu ve gözenekli oldukları bilinmektedir. Bu durum, keskin ve sivri nesnelere karşı koruyucu kapalı yüzeye sahip yapılara kıyasla büyük bir dezavantajdır. Ancak esneklikleri sayesinde, katmanlı yapılarda ve kompozitlerde kullanımında, darbe enerjisini sönümleme performansları çok iyidir [39]. Örme kumaşlar, şekil alabilir ve esnek özellikleri sayesinde özellikle kadınlara yönelik yumuşak vücut zırhlarının geliştirilmesinde kullanılmaktadırlar [40,41]. Ayrıca gözenekli yapıları sayesinde nefes alabilir kumaşlardır. Kalın, yumuşak, esnek örme yapılar, yüksek mukavemetli, kesilmeye karşı dirençli özel elyaf içeren çeşitli iplik yapıları kullanılarak üretildiğinde hedeflenen temel koruma seviyelerine ve konfor özelliklerine ulaşmaktadırlar. Yüksek koruma performansları gereken yerlerde ise kaplama, laminasyon ve farklı apre yöntemleri uygulanarak konfor özelliklerinden ödün vermeden yeterli olan bıçak direncini sağlayabilirler [42]. Oğlacioğlu ve arkadaşları (2014), piyasadaki mevcut yüksek performanslı filament ipliklerin mekanik ve fiziksel performanslarını, özellikle delinmeye karşı dayanım performanslarını incelemişlerdir. Bu doğrultuda hortumlu interlok örgü yapısında Twaron®, UHMWPE, yüksek mukavemetli poliester, yüksek mukavemetli poliamid, kesikli poliamid ve kesikli poliester iplikler kullanmışlardır.

Yüksek performanslı ipliklerle üretilen ön numunelerde ipliklerin yüksek kayganlık özellikleri nedeniyle sökölme sorunu yaşandığı görülmüş ve bu nedenle yüksek performanslı iplikleri, kesikli iplikler ile birlikte kullanılmışlardır. Sonuç olarak, delinme dayanımları açısından kesikli poliester içeren Twaron® kumaşların en yüksek delinme direncine sahip olduğunu gözlemlemişlerdir [43]. Fanguerio ve arkadaşları (2015), çalışmalarında farklı hammaddelerin ve farklı yapıların kesme ve delme dirençlerini test etmek amacıyla para-aramid, UHMWPE, yüksek mukavemetli poliester, yüksek mukavemetli polipropilen ve yüksek mukavemetli poliamid iplikler ile üretilen üç farklı örgü yapısındaki kumaşları test etmişlerdir. UHMWPE iplik ile üretilen bir tür askılı örgü yapısının sivri nesnelere karşı en iyi direnci gösterdiğini, para-aramid iplik ile üretilen pike yapının ise en iyi bıçak darbesi direncini gösterdiğini belirtmişlerdir [44]. Alpyıldız ve arkadaşları (2011), çalışmalarında meta-aramid iplikler kullanarak v yataklı düz örme makinesinde çift yüzlü yeni bir örme kumaş yapısı geliştirmişlerdir. Bu yeni yapıda meta-aramid yatırım ipliği kullanılarak ve yatırım ipliği kullanılmadan örülen farklı iki numune, kesme ve delme performansları açısından karşılaştırılmıştır. Kumaşlarda aramid iplik kullanımının yanı sıra örme konstrüksiyonunun etkisi de incelenmiştir. Yatırım iplikleri ile iplikler arası sürtünmenin arttığını, aynı gramaj ve kalınlık değerlerine sahip aramid içermeyen kumaşlara kıyasla, aramid içeren kumaşların çok daha iyi kesme ve delme direncine sahip olduğunu belirtmişlerdir [45]. Miao ve arkadaşları (2014), çalışmalarında UHMWPE iplikler ile ürettikleri çözümlü örme kumaşların bıçak dirençlerini dokuma kumaşlarla karşılaştırdıklarında, örme kumaşların boşluklu yapıları nedeniyle kolayca delindiğini ve ilmeklerin arasına giren bıçağın iplikleri kolayca kestiğini belirtmişlerdir. Bu sebeplerle çözümlü örme kumaşların bıçak direnci yüksek kompozit veya hibrit yapılarda ara katman olarak kullanılmasının daha uygun olacağını söylemişlerdir [46]. Mishra ve arkadaşları (2019), çalışmalarında dokuma kumaşlara epoksi reçine uygulayarak elde ettikleri iki kompozit katman arasında poliester üç boyutlu çözümlü örme kumaş kullanarak sandviç yapılar elde etmişlerdir. Ara katmanda kullanılan esnek ve hacimli üç boyutlu çözümlü örme kumaşın gerçekleştirilen bıçak direnci ve bilyalı patlatma testlerinde, darbe sönümleme performansının çok iyi olduğu tespit edilmiştir [39]. Xuhong ve arkadaşları (2012), yaptıkları çalışmada UHMWPE ve monofilament poliester kullanarak üretilen çözümlü örme kumaşların bıçak darbelerine karşı etkisini incelemişlerdir. Kumaş kalınlığının, kumaş yoğunluğunun ve kumaşın basma özelliklerinin bıçak darbelerine karşı korumaya doğrudan etkisinin olduğunu söylemişlerdir. Üç boyutlu çözümlü örme yapıların, kumaş ve bıçak arasındaki sürtünmeyi artırdığı ve bu sayede belirli bir derinliğe ulaşan bıçağı kumaş içerisinde kilitleyebildiği gözlemlemişlerdir. Bıçak darbesini sönümleyerek daha büyük bir alana dağıtan bu yapıların, bıçak darbelerine karşı korumada kullanılabileceğini belirtmişlerdir [47]. Sheffer ve arkadaşları (2005), örme kumaş takviyeli kompozitlerin darbe dayanımlarını incelemişlerdir. S-cam iplikten 1x1 rib, interlok ve milano rib şeklinde örülmüş üç farklı yuvarlak örme yapısı oluşturmuşlardır. Örme yapıların her birine epoksi reçine emdirerek kompozit yapılar elde etmişlerdir. Elde edilen kompozitlere sıra ve çubuk yönlerinde

mukavemet ve darbe testleri yapmışlardır. Milano rib konstrüksiyon ile kuvvetlendirilen kompozitler sıra yönünde en iyi dayanımı sağlarken interlok konstrüksiyon ile kuvvetlendirilen kompozitlerin ise çubuk yönünde en iyi dayanıma sahip olduğunu tespit etmişlerdir [48].

4.3. Dokusuz yapılar

Liflerin rastgele yüzey halinde oryante edilmesi ve ardından mekanik ya da ısı ile fikselenmesi ile üretilebilen dokusuz yüzeyler, boşluklu yapılarından dolayı bıçak darbelerine karşı korumada genellikle ara veya destek katmanı ya da kompozit takviyesi olarak kullanılmaktadırlar. Boşluklu yapıları sayesinde esnek ve hafif malzemelerdir. Rastgele lif yerleşiminin yanında ipliklerin aynı yönde ve birbirlerine paralel olarak yerleştirilmesi ile üretilen tek eksenli dokusuz yüzeylerin, belirli açılarda üst üste sıralanması ile oluşturulan katmanlı yapılar, maruz kaldıkları darbe enerjisini kolayca absorbe edebilirler. Ayrıca birbirlerine paralel şekilde yüksek performanslı liflerden oluşan dokusuz yüzeye, dikiş veya termoplastik film laminasyonu ile entegre edilen çelik tellerin, bıçaklanma ve delinme direncini büyük oranda artırabilir [49]. Lou ve arkadaşları (2011), yaptıkları çalışmada yüksek mukavemetli poliester ve düşük erime noktalı poliester karışımı elyaf kullanılarak elde edilen dokusuz yüzeylere, farklı sıcaklıklarda ve farklı sürelerde işlem uygulamışlardır. Ardından %100 cam ve %100 naylon bezayağı kumaşlara lamine etmişlerdir. Laminasyon işleminin ardından kompozitleri iğne ile fikselemişler ve testler uygulamışlardır. Testler sonucunda, cam ve naylon kumaşlara dokusuz yüzeyler lamine edildiğinde, koruyucu yapıların gramajlarında kayda değer bir artış oluşmadan, bıçak ve delinme dirençlerinde büyük bir iyileşme sağlandığı tespit edilmiştir [50]. Hassim ve arkadaşları (2011), çalışmalarında tek yönlü UHMWPE kumaşları birbirle-riyle 0° ve 90° açı yapacak şekilde konumlandırmış ve katmanlı koruyucu yapıların enerji emilimi ve delinme direnci performansları karşılaştırmışlardır. İşlemsiz kumaşların delaminasyon ve lif kopmaları nedeniyle yetersiz delinme direnci performansı gösterdiği tespit edilmiştir. Bu sebeple kumaşlar bir, iki ve üç defa uygulanan emdirme prosesi ile kauçuk kaplanıp, delinme ve enerji emilim performanslarının artırılması amaçlanmıştır. Kaplanan kumaşlar arasında en iyi performansı üç defa emdirme prosesi uygulanan yapıların verdiği tespit edilmiştir. Kauçuğun aynı zamanda kumaşın elastikliğini artırdığı belirtilmiştir [51]. Bu çalışmalara ek olarak, aramid keçe takviyeli kompozit yapıların, kısa ve sık lifler içeren yapısı sayesinde yüksek bıçak direnci gösterdikleri vurgulanmıştır [52,53]. Mawkhlieng ve Majumdar (2020), çalışmalarında UHMWPE tek yönlü katmanlar ve farklı dokuma kumaşlardan oluşan kompozit panellerin farklı konfigürasyonlarını incelemişlerdir. Tek yönlü katmanların çarpma yüzünde kullanıldığında daha iyi performans gösterdiklerini belirtmişlerdir [54]. Lin ve arkadaşları (2020), geri dönüştürülmüş Kevlar®, naylon ve düşük erime noktalı polyester liflerinden elde ettikleri dokusuz yüzeylerin arasında kesikli ve filament formda yüksek mukavemetli poliester lifler içeren dokusuz yüzeyler kullanarak katmanlı malzemeler üretmişler ve bu yapıları iğne ile fikselemişlerdir. Ardından üretilen üç katmanlı yapıların bıçak ve delinme dirençlerini incelemişlerdir. Sonuçta ara katmanda kesikli lif içeren katmanlı yapıların çok daha iyi performans gösterdiğini belirtmişlerdir [55]. El Messiry

ve arkadaşları (2020), çalışmalarında üç eksenli Kevlar® kumaşların katmanlı olarak kullanıldığı durumlardaki kesilme dirençlerini araştırmışlardır. Bunun için tek katman, iki, üç ve dört katman üç eksenli Kevlar® kullanılarak oluşturulan yapılara kesme testleri yapılmıştır. Sonuçlar, çok katmanlı yapıların kesme kuvvetinin üç eksenli Kevlar® kumaş katmanlarının sayısı ile doğrusal orantılı olduğunu göstermiştir. Çalışmada ayrıca yüksek alan yoğunluğuna sahip üç eksenli kumaşlar ile daha düşük alan yoğunluğuna sahip üç eksenli kumaşların birden fazla katman olarak kullanımları da kıyaslanmış ve yüksek alan yoğunluğuna sahip yapıların daha etkili sonuçlar verdiği gözlenmiştir [56].

4.4. Kaplamalı ve laminasyonlu yapılar

Kaplamalı kumaşlar, kumaşın bir ya da her iki yüzeyinin kimyasal bir maddeyle kaplanması sonucu elde edilmektedir [57]. Laminasyon ise birden fazla kumaş katmanlarını ya da kumaş ve farklı malzemeleri, kompozit yada katmanlı bir yapı oluşturmak için birleştirme prensibine dayanır [57]. Yumuşak vücut zırhları konusunda yapılan çalışmalar neticesinde elde edilen temel iplik ve kumaş yapısı bulgularıyla oluşturulan koruyucu katmanların, farklı malzemelerle kaplanarak ve/veya farklı özelliklerde filmler lamine edilerek performans özelliklerinin artırılması konusundaki çalışmalar oldukça fazladır. Termoplastik bir film ile lamine edilmiş, yüksek performanslı lifler içeren çok katmanlı kumaş yapılarının, kauçuk veya metal film katmanı içerdiğinde yüksek bıçak ve delinme direnci gösterdiği bilinmektedir [58,59]. Mayo ve arkadaşları (2009), çalışmalarında sıcak pres ile polietilen (PE), Surlyn® ve PE ile birlikte çekilmiş Surlyn® (CX: co-extruded Surlyn®) filmleri para-aramid bezayağı dokuma kumaşlara lamine ederek elde edilen yapıların, bıçak ve sivri nesnelere karşı dirençleri ve koruyucu katmanda oluşan delinmenin mekanizması incelenmiştir. Bıçak darbesi sırasında liflerin kesilmesi sonucu oluşan boşluk içerisinden bıçağın geçtiği gözlenmiştir. Sivri nesne darbesi sırasında ise liflerin arasına giren nesnenin, dokuma yapısını aralaması sonucunda koruyucu yü-zeyde oluşan boşluk içerisinden geçtiği tespit edilmiştir. Sonuç olarak film lamine edilen kumaşların, işlemsiz kumaşlara göre bıçak ve sivri nesne darbelerine karşı çok daha yüksek koruma sağladığı görülmüştür. Surlyn film uygulanan kumaşın her iki darbeye karşı en iyi sonucu verdiği belirtilmiştir. Film uygulanan mukavemeti artırılmış katman ve kumaş kalınlığı artırılmış katman kullanılarak çok daha yüksek koruma sağlayan yapıların elde edilebileceği aktarılmıştır [60]. Firouzi ve arkadaşları (2014), delinme ve bıçak direnci yüksek, esnek ve hafif zırhlar geliştirmek üzere yaptıkları çalışmada, UHMWPE bezayağı dokuma kumaşların delinme ve bıçak direncini arttırmak amacıyla poliamid 6.6 ve 6.12 kaplaması uygulamıştır. Poliamid 6.6 kaplanan kumaşın sivri nesne ile delinme direncinde %77, poli-amid 6.12 kaplanan kumaşın sivri nesne ile delinme direncinde %86'lık bir performans artışı olduğu gözlenmiştir. Poliamid kaplı kumaşların bıçak direnci performanslarında kayda değer bir değişim olmadığı tespit edilmiştir [61]. Li ve arkadaşları (2014), çalışmalarında bıçak darbesine karşı koruyucu vücut zırhlarında kullanılan tek yönlü UHMWPE takviyeli kompozitlerin, aramid kumaşlara kıyasla daha iyi koruma performansı gösterdiğini belirtmişlerdir. Bu bilgi doğrultusunda UHMWPE elyaf ile hazırlanan tek yönlü kumaşları farklı açılarda üst üste konumlanarak katmanlı yapılar oluşturmuşlardır. Katmanlar arasında PP, PE ve PET gibi

termoplastik filmler yerleştirilerek sıcak presleme ile elde edilen kompozit yapıların koruma performanslarını test etmişlerdir. PP ve PET film kullanılan kompozitlerin bıçak darbeleri ve delinmeye karşı koruma performanslarında önemli derecede iyileşme olduğu gözlenmiştir [62]. Li ve arkadaşları (2018), düşük erime noktalı polietilen tereftalat dokusuz yüzeylerin arasına bezayağı dokuma bazalt kumaşları lamine etmişler ve iğne ile fikselemişlerdir. Ardından yarı statik bıçak testi yapılmış ve kompozit yapıları bıçak direnci performansları da incelenmiştir. Sonuçta kompozitlerin bıçak dirençlerinin kumaş yoğunluğu ve iğneleme yoğunluğu ile doğrudan etkilendiğini belirtmişlerdir [63]. Farklı özelliklerdeki metal veya inorganik oksit tozu ile kaplanan kumaşların bıçak ve delinme direncinin iyileştiği belirtilmektedir. [64,65]. Gadow ve Niessen (2006), yumuşak vücut zırhlarında, üzeri seramik kaplı kumaşların kullanımının, bıçak darbelerine karşı koruma performansını arttırdığını ileri sürmüşlerdir. Bu doğrultuda; sert ve ateşe dayanıklı bir üst kaplama ile esnek, yüksek mukavemetli ve hafif bir kumaş geliştirmişlerdir. Sonuçta bıçak ve delici aletlerin, sert malzeme kaplı çok tabakalı kumaşlara nüfuz etmesinin etkili bir şekilde engellendiği tespit edilmiştir [66]. Malakooti ve arkadaşları (2017), çalışmalarında para-aramid dokuma kumaşların yü-zeyine nano malzemeler aşılacak balistik koruma performanslarını arttırmayı hedeflemişlerdir. Bu amaçla kumaş üzerinde ZnO kaplama uygulamış ve yaptıkları testlerde iplikler arasındaki sürtünmenin artmasının sonucu olarak tek kat aramid kumaşın darbe dayanımının %66 kadar arttığını belirtmişlerdir [67]. Nayak ve arkadaşları (2018), çalışmalarında para-aramid ve balistik naylon iplikler ile üretilen bezayağı dokuma kumaşları bor karbür ile kaplamış, bıçak dirençleri ve termofizyolojik konfor özelliklerini incelemişlerdir. Yapılan kaplama işleminin kumaşların bıçak direnci özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiği gözlenmiştir. Kaplama işleminin kumaşların hava geçirgenliği özelliğini düşürdüğü, su buharı direncinin ve ısı direncinin ise arttığı belirtilmiştir. Bu nedenle kaplanmış kumaşların, istenen koruma performansı özelliklerine ulaşabilmesi adına konfor performansının bir miktar düşmesinin kabul edilebilir olacağı paylaşılmıştır [68]. Yang ve arkadaşları (2020), bor karbür parçacıkları ile kaplanmış UHMWPE kumaşların bıçak dirençlerini araştırmışlardır. Parçacık boyutu 5 mikron, kaplama kalınlığı 100 mikron, kaplama sıcaklığı 64 °C ve parçacık-bağlayıcı oranı 2:3 olduğunda kumaşların bıçak direnci performanslarının en iyi seviyede olduğu belirtilmiştir. Ayrıca emilen enerji ile katman sayısı arasındaki ilişkinin, bor karbür parçacıkları tarafından etkilendiği görülmüştür [69]. Roy ve arkadaşları (2017), yaptıkları çalışmada doğal kauçuk kaplı para-aramid ve UHMWPE bezayağı dokuma kumaşların darbelere karşı koruma performanslarını incelemişlerdir. Yapılan testlere göre, kauçuk kaplı tek kat kumaşların darbe emilimi oldukça düşük kalırken, kauçuk kaplı kumaşların iki kat olarak kullanıldığı durumda darbe emilimi önemli derecede artmıştır [70]. Manace ve arkadaşları (2020), çalışmalarında aramid kumaşların bıçak direncini arttırmak için kumaşları seramik kaplamanın en iyi yöntemlerden biri olduğunu belirtmişlerdir. Bezayağı dokuma aramid kumaşların seramik kaplanmasında bakır ve alüminyum olmak üzere iki farklı bağlayıcı katman kullanmışlar ve bu bağların kumaşların koruyucu performanslarına etkilerini karşılaştırmışlardır. Sonuçlarda seramik kaplı kumaşların işlemsiz kumaşlara göre beş kat daha büyük direncine sahip oldukları belirtilmiştir. Ayrıca bağla-

yıcı katman olarak bakır kullanılan kumaşların alüminyum kullanılan kumaşlara göre daha iyi bıçak koruma performansına sahip oldukları gözlenmiştir [71]. Dokuma veya örme kumaşlara poliüretan (PU), kauçuk gibi özelliklere sahip malzemeler ile üretilmiş yüksek darbe sönmüleyici yapıların, tekstil yüzeyine lamine edildiği çalışmalar mevcuttur. Ancak bu tür yapıların delinme ve bıçak direnci açısından koruma sağlayamadıkları bilinmektedir [72].

4.5. Kompozit yapılar

Kompozitler, farklı özelliklerde matris ve takviye malzemelerinin farklı tekniklerle bir araya getirilmesiyle oluşturulan önekilerden çok daha farklı ve fonksiyonel özelliklere sahip malzemelerdir [7]. Yüksek performanslı lif takviyeli, termoset veya termoplastik reçine matrisi ile oluşturulan esnek kompozitler ise yumuşak vücut zırhlarında bıçak ve delinme direnci yüksek yapıların geliştirilmesi için sıklıkla kullanılmaktadırlar. Plaka şeklinde oluşturulan tekstil takviyeli esnek kompozit yapılar, metal veya seramik plakalara kıyasla daha hafif malzemelerdir. Kim ve Nam (2011), bezayağı para-aramid dokuma kumaş takviyeli kompozitler oluşturmak için termoplastik düşük yoğunluklu polietilen (LDPE - Low Density Polyethylene) reçine ve termoset epoksi reçine kullanılmıştır. Üretilen farklı iki yapının delinmeye karşı dirençleri değerlendirilmiştir. Yapılan testler sonucunda, kullanılan iki reçinenin bıçak darbelerine karşı direnç mekanizmalarının ayrı olduğu gözlenmiştir. LDPE reçine uygulanmış para-aramid kumaşların bıçak testine karşı davranışı sırasıyla ilk penetrasyon adımı, bıçak kenarı ile kesme adımı ve biriken lif demetlerinin kesilmesi adımı olmak üzere üç farklı aşamada gerçekleşmektedir. Diğer yandan, epoksi reçine uygulanmış para-aramid kumaşlar, sırasıyla ilk penetrasyon adımı ve bıçak kenarı ile kesme adımlarını gösterir. Ayrıca bulgulara göre ilk penetrasyon anında bıçak darbesine karşı maksimum direncin gösterildiği anlaşılmıştır. Bununla birlikte, reçine tipinden bağımsız olarak ilk penetrasyondan sonra bıçak darbesine karşı direnç önemli ölçüde azalmıştır. Ayrıca LDPE uygulanmış kumaşlar, çok katmanlı olsalar dahi reçine takviyesi ile performans artışı bahsedilen üç aşamadan sadece ilk penetrasyon aşamasında gözlenmiştir. Bıçak kenarı ile kesme aşamasında ve biriken elyafları kesme aşamasında performans iyileştirmesi sağlanamadığı görülmüştür [73]. Stojanovic ve arkadaşları (2013), çalışmalarında çok eksenli aramid kumaş takviyeli kompozitlerin bıçak dayanımı ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Para-aramid kumaş üzerine poliüretan ve polivinil butiral karışımına reçine uygulanarak elde edilen kompozit yapıya, ağırlıkça %5 silika nanopartiküllerinin eklenmesinin, mekanik özelliklerde önemli bir iyileşme sağladığı tespit edilmiştir. Bunun yanında bir bağlama ajanı olan silan ve çapraz bağlama ajanı olan glutaraldehit ilavesinin, hibrit nanokompozitlerin bıçak direnci özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür [74]. Khodadadi ve arkadaşları (2019), çalışmalarında Kevlar® bezayağı dokuma kumaş takviyeli kauçuk matrisli kompozitlerin darbe dayanımlarını incelemiştir. Ölçüm sonuçları değerlendirildiğinde, işlemsiz kumaşlara kıyasla kauçuk matrisli kompozit içerisindeki ipliklerin daha kolay koptuğu ancak kauçuk matrisin, kompozit yapının esnekliğini koruyarak darbe dayanım performansını geliştirdiği gözlenmiştir. Kauçuk matrisin sertliği arttıkça, moleküller arası zincirlerin bağ yapılarının güçlendiği ve böylece düşük sertlikteki

kauçuk matris içeren kompozitlere kıyasla daha yüksek enerji sönmüleme kapasitesine erişildiği belirtilmiştir [75]. Cheon ve arkadaşları (2019), çalışmalarında düşük ağırlıklı polis kalkanları üretimi için karbon, cam ve para-aramid beza-yağı dokuma kumaşların takviye malzemesi ve epoksi reçine matris malzemesi olarak kullanıldığı kompozitlerin bıçak ve delinme dirençlerini incelemiştir. İlk aşamada yapılan testler sonucunda, karbon takviyeli kompozit yapının darbeyi en geniş alana yayabilmesi nedeniyle en yüksek koruma performansını gösterdiği tespit edilmiştir. Sonraki aşamada, optimizasyon çalışması için karbon-aramid ve karbon-cam gibi farklı kombinasyon-da katmanlı hibrit kompozitler üretilmiştir. Testler sonucunda, karbon-aramid hibrit kompozitlerin en iyi koruma performansını gösterdiği tespit edilmiştir [24]. Xia ve arkadaşları (2019), yu-muşak vücut zırhlarının bıçak direncini artırmak ve ağırlıklarını azaltmak için yaptıkları çalışmada, aramid kumaş, epoksi reçine ve bor karbür ile hazırlanan kompozitlerin bıçak dirençlerini değerlendirmişlerdir. Üretilen kompozitlerdeki bor karbür partiküllerinin çapı ve yoğunluğu değiştirilerek en yüksek bıçak direncine sahip yapının tespit edilmesi amaçlanmıştır. Yapılan testler sonucunda, bor karbür partikül çapı küçüldükçe ve partiküllerin belirli bir alandaki yoğunluğu arttıkça, kompozitlerin esnekliği artmış ve bu sayede bıçak dirençlerinin iyileştiği tespit edilmiştir [76]. Naveen ve arkadaşları (2020), daha yüksek balistik dirence ve daha düşük yoğunluğa sahip doğal liflerin kompozit içerisinde kullanıldığında Kevlar® kumaşa iyi bir alternatif olabileceğini, bu sayede doğa dostu ve sürdürülebilir koruyucu kompozit malzemelerin geliştirilebileceğini çalışmalarıyla aktarmıştır [77].

4.6. Kesme gerilimi altında kalınlaşan sıvı (STF) uygulanmış yapılar

Konvansiyonel yumuşak vücut zırhlarının genellikle para-aramid, UHMWPE, karbon gibi yüksek performanslı liflerden üretilmiş, kaplama ve laminasyon uygulamalarıyla fonksiyonel özellikleri artırılmış dokuma, örme ve dokusuz yüzeylerle üretilebildiği, bu çalışmanın önceki bölümlerinde aktarılmıştır. Wagner ve Wetzel (2003), Kevlar® kumaşlara, Türkçe literatüre kesme gerilimi altında kalınlaşan sıvı tanımıyla geçmiş olan STF (Shear Thickening Fluid) ekleyerek bu yapıların esnekliğini ve balistik performansını artırmayı başarmışlardır [78]. STF'lerin tekstil yapıları ile birlikte kullanıldığı bu ilk çalışmadan günümüze kadar pek çok benzer çalışma yapılmıştır. STF, ani ve sert bir darbeye maruz kaldığında viskozitesi değişen ve katı gibi davranabilen konsantrasyonlara verilen genel bir isimdir [79,80]. STF'leri darbeye karşı korumada tercih edilebilir kılan en önemli özelliği, darbeden önceki ilk haline geri dönebilir olmalarıdır. Yani darbe sırasında viskozitesi artan ve katı gibi davranan sıvı malzeme, kuvvet ortadan kalktığında eski viskozitesine dönebilir. Son yıllarda yapılan çalışmalar sonucu STF materyaller kullanılarak yüksek performanslı, esnek ve hafif vücut zırhlarının üretilebileceğini destekleyen bulgular elde edilmiştir. Yumuşak vücut zırhlarında kullanılan tekstillere STF uygulanarak ağırlık ve esneklik gibi özellikleri kayda değer seviyede etkilenmeden, bıçak ve darbe dayanımları artırılabilir [5]. Decker ve arkadaşları (2007), silika bazlı STF ile muamele edilmiş Kevlar® ve Naylon kumaşların bıçak direncini araştırmış ve aynı

bıçak darbesine maruz bırakılan, eşdeğer alan yoğunluğundaki ham kumaş yapıları kıyasla daha iyi sonuçlar elde etmişlerdir. Böylece STF'lerin bıçak tehditlerine karşı geliştiril-miş koruma sağlayan esnek gövde zırhı imalatında kullanılabilir-ceğini belirtmişlerdir [81]. Gürgen ve Kuşhan (2016), çalışmaları-nda STF emdirilmiş bezayağı para-aramid kumaşların bıçak direnci performanslarında STF'nin etkisini incelemişlerdir. Çok fazlı STF emdirilmiş kumaşların tek fazlı STF emdirilmiş kumaşlara kıyasla çok daha yüksek bıçak direnci performansı gösterdikleri tespit edilmiştir. Ancak çok fazlı STF kullanımının kumaşları fazla sertleştirdiği ve kumaş üzerindeki darbe dağılımını olumsuz yönde etkilediğini belirtmişlerdir. Çok fazlı STF ve optimum sayıda katman kullanılarak yüksek performansa sahip yapıların geliştirilebileceği tespit edilmiştir [82]. STF içeren yapıların farklı kompozit katmanlar arasında kullanıldığı sandviç yapılar çok yüksek delinme ve bıçak direncine sahip olmalarına rağmen ağır ve rijit yapılarıdır [78]. Zhang ve arkadaşları (2020), çalışmalarında 12 nm ve 0,5 mm boyutlarında silika parçacıklar içeren STF emdirilmiş Kevlar® kumaşların yarı statik bıçak ve dinamik darbe direnci performanslarını incelemişlerdir. STF içerisindeki silika parçacıklarının mikro ve nano boyutlu oluşundan bağımsız olarak STF emdirilmiş kumaşların bıçak ve darbe performanslarının iyileştiği vurgulanmıştır [83]. Li ve arkadaşları (2016), çalışmalarında STF emdiril-miş UHMWPE dokuma kumaşların bıçak direnci performansla-rını, bıçak ve sivri nesnelere karşı direnç mekanizmalarını ince-lemişlerdir. STF 'lerin, iplikler arası sürtünmeyi artırıp birbirleri üzerinden kayma eğilimini azalttığı ve bu sayede daha iyi koru-ma performansı gösterdiği anlaşılmıştır. Ayrıca STF konsantras-yonunun ve moleküler zincir uzunluğunun artması sonucu kumaşların delinme direnci performansının iyileştiği tespit edil-miştir [84]. Qin ve arkadaşları (2020), silika mikro küreler içeren, farklı oranlarda STF emdirilmiş kumaşların delinme dirençlerini incelemişlerdir. Kevlar® bezayağı kumaşların %34,89 STF içerdiğinde maksimum delinme direnci gösterdiğini tespit etmişlerdir. Mikro küreler, hem yumuşak hem de sert dar-belere karşı oldukça yüksek delinme direnci performansı göster-miş ve kumaşların mekanik özelliklerini iyileştirmiştir [85]. Santos ve arkadaşları (2020), yaptıkları çalışmada farklı konsant-rasyonlarda silika nanoparçacıklar içeren STF emdirilmiş Kevlar® kumaşları incelemişlerdir. En yüksek konsantrasyonda silika parçacık içeren Kevlar® kumaşların, bıçak ve darbe direnci performanslarının oldukça yüksek olduğunu aktarmışlar-dır. Bu performansların çok sayıda ve farklı açılarda oryante edilmiş katman kullanılarak daha da iyileştirilebileceği belirtil-miştir. Bununla beraber yüksek miktarda STF emdirilmiş Kevlar® kumaşların esnekliğinin azaldığı da çalışmalarının çıktısı olarak sunulmuştur [86]. Kang ve arkadaşları (2010), Kevlar® bezayağı kumaşlara, silika ve etilen glikol içeren STF emdirerek bıçak ve delinme dirençlerini incelemişlerdir. STF emdirilen kumaşların, işlemsiz kumaşlara kıyasla esneklik kaybı yaşamadığı ancak delinme direnci performanslarında büyük bir iyileşme sağlandığı belirtilmiştir [87]. Emdirme ve kaplama yöntemleriyle üretilen kumaş uygulamaları dışında, üç boyutlu örme ya da dokuma ile oluşturulmuş bir iskelet yapısındaki ceplere STF enjekte edilerek

üretilen bıçak ve delinme direnci yüksek yapılar da mevcuttur [88,89].

5. STANDARTLAR VE TEST METOTLARI

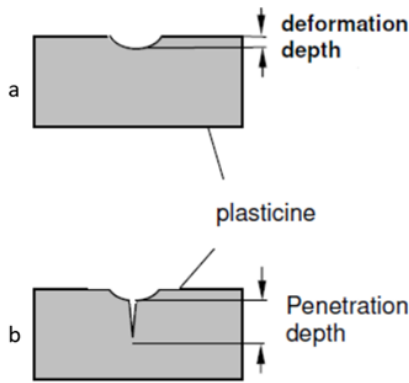
Vücut zırhlarının gün geçtikçe daha yeni daha etkili teknoloji ve malzemelerle geliştirilmesi ve bu zırhların kullanımının artmasına bunun sonucunda da çok farklı yapıdaki zırhların performanslarının değerlendirmesi için bir dizi test standardının oluşturulmasına ihtiyaç duyulmuştur. Bu ihtiyaç sonucunda farklı özelliklerde üretilen vücut zırhlarının bıçak ve delinmeye karşı koruma performanslarını değerlendirmek üzere, zaman içinde farklı test metotları ve uluslararası standartlar geliştirilmiştir. Genel olarak metotlar uygulama mekanizmalarına göre dinamik ve yarı statik olmak üzere iki kategoriye ayrılabilir [90]. Bu uygulama mekanizmaları ve test metotları, uluslararası standartların oluşturulmasında belirleyici olmuştur. Metotlar, uluslararası standartlarca belirlenen enerji seviyelerinin koruyucu malzeme üzerine uygulanarak koruyuculuk performanslarının belirlenmesi temeline dayanmaktadır. Dinamik testlerde test aparatı yüksek hızlarda ve ivmeli hareket ederken, yarı statik testlerde nispeten daha yavaş ve sabit hızda hareket eder. Bahsedilen uluslararası standartlar arasında, enerji seviyeleri, test düzenekleri, destek malzemeleri ve değerlendirme sistemleri gibi farklar bulunmaktadır. Bu alandaki en yaygın standartlar, NIJ 0115.00, HOSDB ve VPAM KDIW 2004 standartlarıdır.

NIJ 0115.00 standardı, test aparatı olarak iki farklı bıçak ve bir sivri nesne kullanılan dinamik bir test metodudur. Farklı koruma seviyelerinin test edilmesi adına, E1 ve E2 olarak iki farklı enerji seviyesi bulunmaktadır ve enerji seviyeleri, üç farklı koruma seviyesine ayrılmaktadır. Kumaşlar farklı katmanlardan oluşan kompozit bir destek malzemesinin üzerine sabitlenmeden yerleştirilir ve aparat serbest şekilde düşürülerek darbe uygulanır. Destek katmanlarının arasında bulunan şahit kağıda isabet eden darbenin neden olduğu deformasyonunun uzunluğu ölçülerek standartta yer alan değerlendirme tablosundan penetrasyon derinliği tespit edilir. Standartta belirtilen koruma seviyelerinin sağlanması için numunenin maksimum penetrasyon derinliği E1 enerji seviyesi için 7 mm, E2 enerji seviyesi için 20 mm olmalıdır [91].

HOSDB standardı, NIJ 0115.00 standardına çok benzer bir düzenek ile yapılmaktadır ve değerlendirme sistemleri arasında farklılık bulunmaktadır. Darbe enerjisinin büyüklüğüne göre dört koruma performansı grubuna ayrılan metotta, beş tekrarlı yapılan test sonucunda bıçak darbesinde en fazla 8 mm ve altında penetrasyon derinliği olması beklenmektedir. Eğer dört ölçüm sonucu 8 mm'nin altında ise bir ölçümün en fazla 9 mm olmasına müsaade edilir. Bu değerlerin üzerindeki penetrasyon-larda zırh gerekli koruma seviyesini sağlayamaz. Sivri nesne ile yapılan delinme direnci testlerinde ise penetrasyon olmaması beklenmektedir [92].

VPAM standardı, bıçak ve köşeli nesnelere karşı darbe direncini test etmeye yönelik geliştirilmiş bir standarttır. Bıçaklanma

direnci testinde bıçak, sivri uçlu cisim ve iğne benzeri cisimlere karşı koruma performansı değerlendirilir. Köşeli nesnelere karşı darbe direnci testinde ise, sivri köşeli blok gibi cisimlere karşı koruma performansı değerlendirilir. NIJ 0115.00 standardına benzer bir düzenek ile yapılan testin destek malzemesi ve değerlendirilmesi farklıdır. Çok katmanlı kompozit bir destek malzemesi yerine standart kapsamında tanımlanmış kil (plastisin) kullanılarak uygulanmaktadır. Enerji büyüklüklerine göre bıçak direncinde dört, darbe direncinde beş koruma seviyesi bulunmaktadır. Darbe direnci testlerinde deformasyon derinliği baz alınırken bıçak direnci testlerinde penetrasyon derinliği esas alınır. Koruma seviyesine göre belirlenen enerji seviyesinde maksimum derinlik 20 mm olmalıdır [93].



Şekil 1. (a) Kil destek malzemesi üzerindeki deformasyon ve (b) penetrasyon derinliği [93].

Vücut zırhları test edilirken doğru standardın seçilmesi, zırhın koruma performansını doğru bir şekilde değerlendirebilmek için büyük önem taşımaktadır. Doğru test standardını seçmek için, tehdidin niteliği, zırhta kullanılan malzeme ve zırhın koruyuculuk gereksinimleri dikkate alınmalıdır. Gereken durumlarda, koruyucu zırh farklı standart veya test metodlarıyla karşılaştırılmalı olarak test edilmelidir. Gelecekte çok farklı teknoloji veya malzemelerle üretilebilecek olan vücut zırhlarının değerlendirilebilmesi için daha farklı metodlar veya standartlar geliştirmek gerekebilir.

6. SONUÇ

Bu çalışma kapsamında derlenen bilgiler doğrultusunda aşağıdaki yorumlar yapılabilir;

- Geliştirilen yumuşak vücut zırhlarının öncelikle kullanım alanları ve maruz kalabilecekleri tehditler tanımlanmalıdır. Uygulanacak test standartları bu tanımlara göre belirlenmekte ve uygun koruma performansı seviyeleri bu doğrultuda sınıflandırılmaktadır.
- Bıçaklanma, delinme ve sivri köşeli nesne kaynaklı darbeler sonucu oluşabilecek ölümcül yaralanmalara karşı koruyucu yumuşak vücut zırhlarında yüksek performanslı liflerin kullanımı, diğer liflere göre hafifliğin yanında çarpıcı seviyede yüksek koruma performansı sağladığından, bu liflerin söz konusu zırhlar için vazgeçilmez hammaddeler olduğu anlaşılmıştır.

- Yumuşak vücut zırhlarında kullanım alanına, koruma seviyesine ve kumaş yapısına bağlı olarak monofilament, multifilament veya kesik elyaftan üretilen iplikler kullanılabilir. Keskin veya sivri köşeli obje ya da blok ile oluşan darbelere yönelik yapılarda yüksek kopma mukavemetine ve esneklik modülüne sahip monofilament ve multifilament ipliklerle üretilen tek eksenli kumaş katmanların, farklı açılarda üst üste birleştirilmesi ile güçlendirilmiş yapıların kullanımı sonucunda, yüksek performans özelliklerinin sağlandığı görülmüştür. Bıçak ve sivri nesnelere ile delinme gibi tehditler söz konusu olduğunda ise, bıçak-kumaş arası ve iplikler arası sürtünmeyi artıran ve bunun yanında hacimli yapıyla gelen darbenin enerjisini sönmüleyebildiği için kesik elyaftan üretilen yüzey tüylülüğü yüksek ipliklerin kullanılmasının daha uygun olduğu tespit edilmiştir.

- Yumuşak vücut zırhlarının üretiminde dokuma, örme ve dokusuz kumaş yapılarının kullanıldığı görülmüştür. Bezayağı ve dimi dokuma kumaş yapılarının, sık ve kapalı yüzeyleri sayesinde bıçak ve delinme direncini artırdığı tespit edilmiştir. Çok eksenli dokuma kumaş yapılarının, gelen darbe enerjisini farklı eksenlere yayarak sönmüleyebildiği ve bunun yanında yüksek yüzey stabiliteyi sayesinde bıçak darbelerine karşı daha iyi koruma performansı sağladığı belirlenmiştir. Hacimli örme kumaşların, esnek yapıları sayesinde gelen darbe enerjisini daha iyi sönmüleyebildiği ve bu nedenle katmanlı yapılarda ara katman olarak kullanıldığı belirlenmiştir. Buna ek olarak üç boyutlu örgülü örme kumaşların monofilament yerleşimleri sayesinde bıçak enerjisini daha iyi absorbe edebildiği tespit edilmiştir. Dokusuz yüzeyler üretim teknikleri bazında farklı özellikler göstermekle birlikte, iğneleme yöntemiyle üretilen kumaş tipleri ara katman olarak kullanıldığında, kısa ve sık lifler içeren yapıları sayesinde katmanlı yapının bıçak direncini artırdığı görülmüştür.

- Elde edilen kumaş yapılarına uygulanan fonksiyonel işlemlerle koruma performanslarının çarpıcı seviyede iyileştirilebildiği tespit edilmiştir. Kumaş yapılarını kauçuk, naylon gibi esnek malzemeler ile kaplamanın ve STF kullanımının, geliştirilen yapıların darbe emilimi performansını artırdığı görülmüştür. Seramik, metal gibi yüzeyi rijit hale getiren malzemelerle uygulanan kaplamalar, bıçak ve sivri nesne kaynaklı darbelerin ilk temas anında nesnelere uçlarını deforme ederek koruyucu yapı içerisine penetrasyon hızını düşürmektedir. Uç yapısı bozulan nesnenin, iplikler arasında boşluk oluşturarak arka yüze geçme kabiliyeti azalmaktadır. Bunun yanında, STF uygulamaları yapılmış veya laminasyon işlemi görmüş yapılarda ipliklerin stabilizasyonu sağlandığından, bıçak ve sivri nesnelere iplikler arasında boşluk oluşturarak arka yüze geçme kabiliyeti azalmaktadır. Tekstil takviyeli ve reçine matrisli kompozit yapılarda, reçine uygulaması sayesinde ipliklerin stabilizasyonunun artması sonucu bıçak ve sivri nesne darbelerine karşı performansın arttığı tespit edilmiştir.

- Yukarıda bahsedilen yüksek performanslı yapılarla veya bu yapıların kombinasyonlarıyla üretilen katmanlı yumuşak vücut zırhlarının, daha yüksek koruma performansı gösterirken hafif ve ince yapısı sayesinde hareket kolaylığı da sağladığı görülmüştür.

KAYNAKLAR

1. El Messiry, M., (2020), *Protective Armor Engineering Design (1st ed.)*, Apple Academic Press.
2. Cheeseman, B.A., Bogetti, T.A., (2003), *Ballistic Impact into Fabric and Compliant Composite Laminates*, *Composite Structures*, 61(1–2), pp. 161–173.
3. Mawkhlieng, U., Majumdar, A., Laha, A., (2020), *A Review of Fibrous Materials for Soft Body Armour Applications*, *RSC Advances*, 10, pp. 1066-1086.
4. Nayak, R., Crouch, I., Kanesalingam, S., Ding, J., Tan, P., Lee, B., Miao, M., Ganga, D., Wang, L., (2017), *Body Armor for Stab and Spike Protection, Part I: Scientific Literature Review*, *Textile Research Journal*, 88(7), pp. 812-832.
5. Arora, S., Ghosh, A., (2018), *Evolution of Soft Body Armor*, *Advanced Textile Engineering Materials*, pp. 499-552.
6. Choi, H.N., Hong, T.M., Lee, E.H., Paik, J.G., Yoon, B.I. Lee, S.G., (2011), *Stab Resistance of Aramid Fabrics Reinforced With Silica STF*, 18th International Conferences on Composite Materials, Lisbon, Portugal 2011.
7. Hosur, M.V., Mayo, Jr. J.B., Wetzel, E., Jeelani, S. (2008), *Studies on the Fabrication and Stab Resistance Characterization of Novel Thermoplastic-Kevlar Composites*, *Solid State Phenomena*, 136, pp. 83–92.
8. Wang, L., Zhang, S., Gao, W., Wang, X., (2007), *FEM Analysis of Knife Penetration Through Woven Fabrics*, *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, Vol:20, pp. 11-20.
9. Tien, D., Kim, J., Huh, Y., (2011), *Evaluation of Anti-Stabbing Performance of Fabric Layers Woven With Various Hybrid Yarns Under Different Fabric Conditions*, *Fibers and Polymers*, 12, pp. 808-815.
10. Hejazi, S.M., Kadivar, N., Sajjadi, A., (2016), *Analytical Assessment of Woven Fabrics Under Vertical Stabbing-the Role of Protective Clothing*, *Forensic Sci Int*;259, pp. 224-233.
11. Basak, S., Laha, A., Bar, M., Roy, R., (2018) *Recent Advances in Protective Textile Materials*, *Advanced Textile Engineering Materials*, pp. 55-86.
12. Tien, D., Kim, J., Huh, Y., (2010), *Stab-Resistant Property of the Fabrics Woven With the Aramid/Cotton Core-Spun Yarns*, *Fibers and Polymers*, 11, pp. 500-506.
13. Aliverdipour, N., Ezazshahabi, N., Mousazadegan, F., (2019), *Characterization of the Effect of Fabric's Tensile Behavior and Sharp Object Properties on the Resistance Against Penetration*, *Forensic Science International*, 306:110097.
14. Franciscus, V.H.W., (2010), *Protective Garment With A Ballistic Resistant Torso Portion and Stab and Cut Resistant Sleeves*, Patent EP2199727A1.
15. Chen, X., Sun, D., Wang, Y., Zhou, Y., (2012), *2D/3D Woven Fabrics for Ballistic Protection*, 4th World Conference on 3D Fabrics and Their Applications, Aachen, Germany 2012.
16. Wang, Y., Chen, X., Young, R., Kinloch, I., Wells, G., (2015), *A Numerical Study of Ply Orientation on Ballistic Impact Resistance of Multi-Ply Fabric Panels*, *Composites Part B: Engineering*, 68, pp. 259–265.
17. Erlich, D.C., Shockey, D. A., Simons, J. W., (2003), *Slow Penetration of Ballistic Fabrics*, *Textile Research Journal*, 73(2), pp. 179–184.
18. Hearle, J.W.S., (2001), *High-Performance Fibres*, Woodhead Publishing & the Textile Institute, Cambridge.
19. Song, Y., Xing, L., (2017), *Comparative Analysis of Structure and Mechanical Properties of Kavler-49 and Heterocyclic Para-Aramid Fibers*, *Chemical Engineering Transactions*, 59, pp. 43-48.
20. Holmes, G., Rice, K.D., Snyder, C., (2006), *Ballistic Fibers: A Review of the Thermal Ultraviolet and Hydrolytic Stability of the Benzoxazole Ring Structure*, *Journal of Materials Science*, 41, pp. 4105-4116.
21. Shin, H., Erlich, D.C., Simons, J.W., Shockey, D.A., (2006), *Cut Resistance of High-Strength Yarns*, *Textile Research Journal* Vol:76(8), pp. 607–613.
22. El Messiry, M., (2014), *Investigation of Puncture Behaviour of Flexible Silk Fabric Composites for Soft Body Armour*, *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, 22, pp. 71-76.
23. Mao, N., (2019), *Textile Materials for Protective Textiles*, *High Performance Technical Textiles*, pp. 107-157.
24. Cheon, J., Lee, M., Kim, M., (2019), *Study on the Stab Resistance Mechanism and Performance of the Carbon, Glass and Aramid Fiber Reinforced Polymer and Hybrid Composites*, *Composite Structures*, 234:111690.
25. Sandor, R.B., (1990), *PBI (Polybenzimidazole): Synthesis, Properties and Applications*, *High Performance Polymers*, 2(1), pp. 25–37.
26. Song, K., Zhang, Y., Meng, J., Green, E., Tajaddod, N., Li, H. Minus, M., (2013), *Structural Polymer-Based Carbon Nanotube Composite Fibers: Understanding the Processing–Structure–Performance Relationship*, *Materials*, 6, pp. 2543-2577.
27. Rao, M.P., Duan, Y., Keefe, M., Powers, B.M., Bogetti, T., (2009), *Modeling the Effects of Yarn Material Properties and Friction on the Ballistic Impact of A Plain-Weave Fabric*, *Composite Structures*, 89, pp. 556-566.
28. Sun, B., Wang, Y., Wang, P., Hu, H., Gu, B., (2011), *Investigations of Puncture Behaviors of Woven Fabrics From Finite Element Analyses and Experimental Tests*, *Textile Research Journal*, 81(10), pp. 992–1007.
29. Özdemir, H., Mert, E., (2013), *The Effects of Fabric Structural Parameters on the Tensile, Bursting, and Impact Strengths of Cellular Woven Fabrics*, *Journal of the Textile Institute*, 104:3, pp. 330-338.
30. Millán, R.M., Díaz-Álvarez, A., & Aranda-Ruiz, J., Díaz-Álvarez, J., Loya, J., (2018), *Experimental Analysis for Stabbing Resistance of Different Aramid Composite Architectures*, *Composite Structures*, 208, pp. 525-534.
31. El Messiry, M., Eltahan, E., (2014), *Stab Resistance of Triaxial Woven Fabrics for Soft Body Armor*, *Journal of Industrial Textiles*, 45(5), pp. 1062–1082.
32. Runjun, S., Xiao, T., Qiushi, W., Mu, Y., Chengkun, L., Gaoyong, L., Meiyu, C., Yan, F., (2016), *Multilayer Multi-Material Flexible Stab-Resistant Fabric and Weaving Method Therefor*, Patent CN106120081.
33. Erb, D.F.Jr., Barter, E.A., (2014), *Puncture Resistant Material*, Patent WO2014190259A2.
34. Zhou, Y., Chen, X., Wells, G., (2014), *Influence of Yarn Gripping on the Ballistic Performance of Woven Fabrics From Ultra-High*

- Molecular Weight Polyethylene Fibre*, Composites Part B: Engineering, 62, pp. 198–204.
35. Pol, S., (2007), *A Stab Resistant Insert for Protective Textile Product*, WO2007065606A1.
 36. Nasser, J., Steinke, K., Groo, L., Sodan, H., (2019), *Improved Interyarn Friction, Impact Response, and Stab Resistance of Surface Fibrillized Aramid Fabric*, Advanced Materials Interfaces, 6(19):1900881.
 37. Li, M., Wang, P., Boussu, F., Soulat, D., (2020), *Dynamic Stab Resistance of Multi-Ply Three-Dimensional Warp Interlock Fabrics With High-Performance High-Molecular-Weight Polyethylene Yarns for Protective Applications*, Journal of Industrial Textiles, pp. 1-21.
 38. Amirshirzad, F., Mousazadegan, F., Ezazshahabi, N., (2020), *Evaluating the Resistance of Metal Reinforced Multi-Layer Textile Structure Against Penetration of Sharp Objects*, International Journal of Protective Structures, pp. 1-18.
 39. Mishra, R., Wiener, J., Militky, J., Petru, M., Tomkova, B., Novotna, J., (2019), *Compression Resilience and Impact Resistance of Fiber - Reinforced Sandwich Composites*, Polymers for Advanced Technologies, 30(12), pp. 3073-3082.
 40. Dong, Z., Jiang G., Wu Z., Cong H., (2015), *3D Parametric Human Modeling for Warp-Knitted Seamless Garment*, International Journal of Clothing Science and Technology, Vol. 27 Issue 4, pp. 532 – 548.
 41. Abteu, M., Bruniaux, P., Boussu, F., Loghin, M.C., Cristian, I., Chen, Y., Wang, L., (2018), *Female Seamless Soft Body Armor Pattern Design System With Innovative Reverse Engineering Approaches*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 98, pp. 2271–2285.
 42. Vidzem, B., Aumann, S., Heimlich, F., Werner, R., Ehrmann, A., Obermann, M., Brücken, A., Weber, M., Bache, T., (2013), *Stab Resistance of Textile Materials*, Aachen-Dresden International Textile Conference, Vol:7, Aachen, Germany 2013.
 43. Oğlakcıoğlu, N., Ertekin, G., Marmaralı, A., (2014), *Investigation of Mechanical Hazard Resistance Properties of Knitted Fabrics Produced By High Performance Yarns*, Tekstil ve Mühendis, 21;95, pp. 1-8.
 44. Fanguero, R., Carvalho, R., Silveira, D., Ferreira, N., Ferreira, C., Monteiro, F., Sampaio, S., (2015), *Development of High-Performance Single Layer Weft Knitted Structures for Cut and Puncture Protection*, J Textile Sci Eng 5: 225, pp. 1-6.
 45. Alpyildiz, T., Rochery, M., Kurbağ, A., Flambard, X. (2011), *Stab and Cut Resistance of Knitted Structures: A Comparative Study*. Textile Research Journal, 81(2), pp. 205–214.
 46. Miao, X., Jiang, G., Kong, X., Zhao, S., (2014), *Experimental Investigation on the Stab Resistance of Warp Knitted Fabrics*, Fibres & Textiles in Eastern Europe, 22, 5(107), pp. 65-70.
 47. Xuhong, M., Xiangyong, K., Jiang, G., (2013), *The Experimental Research on the Stab Resistance of Warp-Knitted Spacer Fabric*, Journal of Industrial Textiles, 43, pp. 281-301.
 48. Sheffer, E., Dotan, A. Yosef, M.B., (2005), *Impact Resistance of Knitted Reinforced Composite Materials*, 5th International Textile Conference, Portoroz, Slovenia 2005.
 49. Hermans, P., Puype, L., Lefebvre, L., (2005), *Stab Resistant Insert With Steel Cords and Nonwoven Textile*, Patent WO2005050127A1.
 50. Lou, C.W., Lin, C.C., Hsing, W.H., Huang, C.C., Chien, Y.M., Lin, J.H. (2011), *Processing Technique and Property Evaluation of Stab-Resistant Composite Fabrics*, Advanced Materials Research, 239–242, pp. 1990-1993.
 51. Hassim, N., Ahmad, M.R., Ahmad, W.Y.W., Samsuri, A., Yahya, M.H.M., (2012), *Puncture Resistance of Natural Rubber Latex Unidirectional Coated Fabrics*, Journal of Industrial Textiles, 42(2), pp. 118–131.
 52. Minshon, C., (2001), *Knife-Stab-Resistant Composite*, Patent WO0150898A1.
 53. Yuval, F., Christian, B., Achim, F., (2001), *Stab Resistant Material*, Patent WO0008411A1.
 54. Mawkhlieng, U., Majumdar, A., (2020), *Designing of Hybrid Soft Body Armour Using Highperformance Unidirectional and Woven Fabrics Impregnated With Shear Thickening Fluid*, Composite Structures, Vol: 253, 112776.
 55. Lin, T.R., Lin, M., Lin, Y., Lou, C., Lin, J., (2020), *Impact Resistance of Fiber Reinforced Sandwich-Structured Nonwoven Composites: Reinforcing Effect of Different Fiber Length*, Materials Today Communications, 24:101345.
 56. El-Messiry, M., El-Tarfawy, S.Y., (2020), *Cutting Resistance of Flexible Armour Using Multiple Layers of Triaxial Kevlar Fabric*, Journal of Industrial Textiles, pp. 1-28.
 57. Bulut, Y., Sülar, V., (2008), *Kaplama veya Laminasyon Teknikleri İle Üretilen Kumaşların Genel Özellikleri ve Performans Testleri*, Tekstil ve Mühendis, 15(70-71), 5-16.
 58. Bhatnagar, A., Wagner, L.L., Murray, H.L., (2007), *Composite Material for Stab, Ice Pick and Armor Applications*, Patent WO2007058679A2.
 59. Bhatnagar, A., Holland, J.E., Nguyen, H., (2007), *Body Armor With Improved Knife-Stab Resistance Formed From Flexible Composites*, Patent WO2007084104A2.
 60. Mayo, Jr. J.B., & Wetzel, E.D., Hosur, M, Jeelani, S., (2009), *Stab and Puncture Characterization of Thermoplastic-Impregnated Aramid Fabrics*, International Journal of Impact Engineering, 36, pp. 1095-1105.
 61. Firouzi, D., Foucher, D., Bougherara, H., (2014), *Nylon - Coated Ultra High Molecular Weight Polyethylene Fabric for Enhanced Penetration Resistance*, J. Appl Polym Sci, 131, 40350.
 62. Li, C., Xiancong, H., Li, Y., Yang, N., Shen, Z., Fan, X., (2014), *Stab Resistance of UHMWPE Fiber Composites Impregnated With Thermoplastics*, Polymers for Advanced Technologies, Vol:25, pp. 1014-1019.
 63. Li, T-T., Zhang, X., Wu, L., Peng, H., Shiu, B-C., Lou, C-W., Lin, J-H., (2018), *Polyethylene Terephthalate/Basalt Stab-Resistant Sandwich Composites Based on the Box-Behnken Design: Parameter Optimization and Empirical Regression Model*, Journal of Sandwich Structures & Materials, 22(7), pp. 2391-2407.
 64. Granqvist, K., Ortegren, A., Castenback, G., (2004), *Stab Resistant Article*, Patent US20040048536A1.
 65. Xiongyi, P., Jian, D., Shuai, P., Yonghong, L., Guoyi, Y., Jun, W., Siwei, S., (2019), *Preparation Method of Puncture-Proof Coating Aramid Fabric*, Patent CN109610190.
 66. Gadow, R., Niessen, K., (2006), *Lightweight Ballistic With Additional Stab Protection Made of Thermally Sprayed Ceramic and*

- Cermet Coatings on Aramid Fabrics*, International Journal of Applied Ceramic Technology, 3, pp. 284 - 292.
67. Malakooti, M.H., Hwang, H.S., Goulbourne, N.C., Sodano, H.A., (2017), *Role of ZnO Nanowire Arrays on the Impact Response of Aramid Fabrics*, Composites Part B Engineering, 127, pp. 222-231.
68. Nayak, R., Kanesalingam, S., Wang, L., Padhye, R., (2018), *Stab Resistance and Thermophysiological Comfort Properties of Boron Carbide Coated Aramid and Ballistic Nylon Fabrics*, The Journal of the Textile Institute, Vol:110, pp. 1159-1168.
69. Yang, W-Q., Liu, X-Y., Yu, Y-P., Yu, W-D., (2020), Evaluation of Stab Resistance of Coated UHMWPE Fabric, *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 28, 2(140), pp. 76-79.
70. Roy, R., Laha, A., Awasthi, N., Majumdar, A., Butola, B., (2017), *Multi Layered Natural Rubber Coated Woven P -Aramid and UHMWPE Fabric Composites for Soft Body Armor Application*, Polymer Composites, 39, pp. 3636-3644.
71. Manace, P., Valefi, Z., Goodarz, M., (2020), *The Effect of Bond Coat Type on the Stab Resistance of Al₂O₃-13 Wt% TiO₂ Plasma Sprayed Ceramic Coating on Aramid Fabrics*, Surfaces and Interfaces, 18, 100432.
72. Radaich, A., (2006), *Impact Resistant Laminates*, Patent WO2006036072A1.
73. Kim, H., Nam, I., (2012), *Stab Resisting Behavior of Polymeric Resin Reinforced P-Aramid Fabrics*, Journal of Applied Polymer Science, Vol:123, pp. 2733-2742.
74. Stojanović, D., Zrilić, M., Jancic Heinemann, R., Zivkovic, I., Kojovic, A., Uskokovic, P., Aleksic, R., (2013), *Mechanical and Anti-Stabbing Properties of Modified Thermoplastic Polymers Impregnated Multiaxial P-Aramid Fabrics*, Polymers for Advanced Technologies, 24, pp. 772-776.
75. Khodadadi, A., Liaghat, G., Ahmadi, H., Bahramian, A.R., Razmkhah, O., (2019), *Impact Response of Kevlar/Rubber Composite*, Composites Science and Technology, 184:107880.
76. Xia, M., Quan, Z., Wang, X., Yu, J., (2019), *Preparation and Characterization of B4C Particle Coated Composites for Stab-Resistance*, Composite Structures, 228:111370.
77. Naveen, J., Jayakrishna, K., Hameed Sultan, M.T.B., Amir, S.M.M., (2020), *Ballistic Performance of Natural Fiber Based Soft and Hard Body Armour- A Mini Review*. Front. Mater., Vol:7, pp. 440-445.
78. Wagner, N. J., Wetzels, E.D., (2003), *Advanced Body Armor Utilizing Shear Thickening Fluids*, Patent US7498276B2 .
79. Boersma, W.H., Lavèn, J., Stein, H.N., (1995), *Computer Simulations of Shear Thickening of Concentrated Dispersions*, Journal of Rheology, 39, pp. 841-860.
80. Mawkhlieng, U., Majumdar, A., (2019), *Deconstructing the Role of Shear Thickening Fluid in Enhancing the Impact Resistance of High-Performance Fabrics*, Composites Part B Engineering, 175,107167.
81. Decker, M.J., Halbach, C.J., Nam, C.H., Wagner, N.J., Wetzels, E.D., (2007), *Stab Resistance of Shear Thickening Fluid (STF)-Treated Fabrics*, Composites and Technology, 67, pp. 567-578.
82. Gürgen, S., Kushan, M., (2016), *The Stab Resistance of Fabrics Impregnated With Shear Thickening Fluids including Various Particle Size of Additives*, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 94, pp. 50-60.
83. Zhang, X., Li, T-T., Peng, H-K., Wang, Z., Huo, J., Lou, C-W., Lin, J-H., (2020), Effects of Bi-Particle-Sized Shear Thickening Fluid on Rheological Behaviors and Stab Resistance of Kevlar Fabrics, *Journal of Industrial Textiles*, pp. 1-16.
84. Li, W., Xiong, D., Zhao, X., Sun, L., Liu, J., (2016), *Dynamic Stab Resistance of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene Fabric Impregnated With Shear Thickening Fluid*, Materials & Design, Vol:102, pp. 162-167.
85. Qin, J., Guo, B., Zhang, L., Wang, T., Zhang, G., Shi, X. (2020), *Soft Armor Materials Constructed With Kevlar Fabric and A Novel Shear Thickening Fluid*, Composites Part B Engineering, 183, 107686.
86. Santos, T.F., Santos, C.M., Fonseca, R.T., Melo, K.M., Aquino M.S., Oliveira F.R., Medeiros, J.I., (2020), Experimental Analysis of the Impact Protection Properties for Kevlar® Fabrics Under Different Orientation Layers and Non-Newtonian Fluid Compositions, *Journal of Composite Materials*, 54(24), pp. 3515-3526.
87. Kang, T.J., Hong, K.H. Yoo, M.R., (2010), *Preparation and Properties of Fumed Silica/Kevlar Composite Fabrics for Application of Stab Resistant Material*, Fibers and Polymers, 11(5), pp. 719-724.
88. Yifan, Z., Ranran, F., Yuling, L., Yanxue, M., (2019), *Anti-Stab Fabric With Shear Thickening Fluid and Rheid*, Patent CN109944074.
89. Zhenqian, L., Guoliang, L., Ping, J., Li, L., Chunxia, W., Baozhong, S., (2014), *Shock-Resisting Flexible Protection Structure and Manufacturing Method*, Patent CN104213322.
90. Nayak, R., Crouch, I., Kanesalingam, S., Wang, L., Ding, J., Tan, P., Lee, B., Miao, M., Ganga, D., Padhye, R., (2018), *Body Armor for Stab and Spike Protection, Part 2: A Review of Test Methods*, Textile Research Journal, 89(16), pp. 3411-3430.
91. Stab Resistance of Personal Body Armor NIJ Standard-0115.00, (2010), National Institute of Justice.
92. HOSDB Body Armour Standards for UK Police 2007, (2017), the Home Office Body Armour Standard.
93. VPAM Test Standard, (2011), VPAM KDIW 2004.