

## Investigation of Ballistic Protection Features of Fabrics Used In Soft Armor Production

Adem VERDİ<sup>1</sup>, Şule Sultan UĞUR<sup>1\*</sup>

**Abstract:** Three basic parameters such as firepower, ballistic protection, and mobility are very important in combat systems. The protection level of armor, one of the most important elements of the defense systems, has also been increased with the development of ballistic science. Armor materials are being developed to protect against various threats with minimum weight via advanced studies. Studies to reduce armor weight to increase the mobility of personnel are becoming more important day by day. Various institutions worldwide are working to develop materials that are low in cost while achieving their protection level/lightness factor targets. This study mentions the definition and types of ballistic protective body armor, the usage areas of soft armor textiles, and the advantages and disadvantages of the obtained products. The protection levels of para-aramid and ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) based ballistic protective soft armor fabrics with different properties against light weapons were tested. Unlike the experimental and simulation studies carried out to date, in this study, 6 types of soft armor fabrics were tested under appropriate laboratory conditions by firing a minimum of 6 shots at each sample by NIJ 01.01.04 Level IIIA and STANAG 2920 standards. In addition, unit consumption analysis of the fabrics was made under current production conditions. As a result of all these studies, advantageous and disadvantageous soft armor systems were determined according to the type of preference.

**Keywords:** Soft armor, ballistic protection, UHMWPE, para-aramid, V<sub>50</sub> test

## Yumuşak Zırh Üretiminde Kullanılan Kumaşların Balistik Koruma Özelliklerinin İncelenmesi

**Özet:** Savaş sistemlerinde atış gücü, balistik koruma ve hareket kabiliyeti gibi üç temel parametre büyük önem arz etmektedir. Bu sistemin alt kolu olan savunma sistemlerinin en önemli unsurlarından zırhların koruyuculuk düzeyi aynı şekilde balistik biliminin gelişimi ile birlikte arttırılmıştır. İleri düzey yapılan çalışmalarla birlikte zırh malzemeleri çeşitli tehditlere karşı minimum ağırlık ile koruma sağlamak için geliştirilmektedir. Personelin hareket kabiliyetini arttırmak için zırh ağırlığını azaltmaya yönelik çalışmalar gün geçtikçe daha da önem kazanmaktadır. Dünya genelinde çeşitli kuruluşlar, koruma düzeyi/hafiflik faktörleri hedeflerine ulaşırken maliyeti düşük olan malzemeler geliştirmek için çalışmaktadır. Bu çalışmada balistik koruyucu vücut zırhlarının tanımı ve çeşitlerinden bahsedilmiş, yumuşak zırh tekstillerinin kullanım alanları ve elde edilen ürünlerin avantaj ve dezavantajları belirtilmiştir. Farklı özelliklere sahip para-aramid ve ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UYMAPE) esaslı balistik koruyucu yumuşak zırh kumaşlarının hafif silahlara karşı koruma seviyeleri test edilmiştir. Günümüze kadar yapılan deneysel ve simülasyon çalışmalarından farklı olarak bu çalışmada 6 çeşit yumuşak zırh kumaşı uygun laboratuvar koşullarında NIJ 01.01.04 Seviye IIIA ve STANAG 2920 standartlarında her bir numuneye minimum 6'şar atış yapılarak test edilmiştir. Bunun yanında kumaşların mevcut üretim koşullarında birim tüketim analizi yapılmıştır. Tüm bu çalışmalar neticesinde avantajlı ve dezavantajlı yumuşak zırh sistemleri tercih türüne göre belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Yumuşak zırh, balistik koruma, UYMAPE, para-aramid, V<sub>50</sub> testi

<sup>1</sup>**Address:** Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, 32260, Isparta, Türkiye

**\*Corresponding author (Sorumlu Yazar):** suleugur@sdu.edu.tr

**Citation (Atıf):** Verdi, A., Uğur, Ş.S. (2023). Yumuşak zırh üretiminde kullanılan kumaşların balistik koruma özelliklerinin incelenmesi. 21. Yüzyılda Fen ve Teknik Dergisi, 10(20): 47-54.

## 1. GİRİŞ

Vücut zırhı, insan vücudunun farklı türdeki saldırılara karşı korunması için hayati önem taşıyan koruyucu ekipmandır. Çeşitli saldırı kaynakları arasında merminin balistik etkisi ise önemli bir öğedir (Azrin Hani vd., 2012). Kurşun geçirmez yekek ile ilişkili balistik darbe, 50-200 µs içinde gerçekleşen dinamik bir olaydır. Bu nedenle, bu zaman dilimi içerisinde zırh yapılarının yüksek hızlı darbelerle etkili bir şekilde yanıt vermesi ve direnmesi gerekir (Crouch, 2019).

Balistik koruyuculuk biliminin gelişmesiyle birlikte kişisel koruyucu personel zırhları, yumuşak ve sert zırhlar olarak iki ana kategoriye ayrılabilir. Yumuşak zırh belirli düşük seviye tehditler için yeterli iken daha yüksek seviye tehditler için sert zırhlar gerekmektedir. Yumuşak zırhlar esnek yapısı nedeniyle personelin vücut hareketi ile birlikte şekil değiştirir ve daha hafiftir. Buna karşın sert zırhlar, belirli bir sürede, basınç ve sıcaklık altında istenilen nihai ürünün formunu alıp (koruyucu miğfer, göğüs plakası, helikopter taban zırhı, vb.) bu halde şeklini uzun yıllar boyunca muhafaza etmektedir. Sert zırhlar yumuşak zırhlara göre üst düzey koruma sağlar ancak daha ağır ve sabit şekillerinden nedeni ile kullanıcı personelin hareket kabiliyetini sınırlandırmaktadır.

Tekstil bazlı vücut zırhları, nasıl üretildiğine bağlı olarak hem yumuşak hem de sert olabilir. Tekstil bazlı vücut zırhında yumuşak vücut zırhı, yüksek performanslı kumaşların birden fazla katmanının dikilmesiyle üretilir. Öte yandan sert zırh, polimer matristeki yüksek performanslı kumaşın çoklu katmanlarının güçlendirilmesiyle üretilir (Anand vd., 2023).

Vücut zırhı söz konusu olduğunda performans ve hareket kabiliyeti son derece önceliklidir. Geleneksel olarak vücut zırhı, temel malzeme olarak ağır ve sert olan çelik ve seramikten üretilirdi. Ayrıca bu sert vücut zırhları insan vücudu kısımlarından boyun, omuz ve eklemlerini koruyamıyordu. Bu sınırlamaların üstesinden gelmek için araştırmacılar odaklarını tekstil bazlı vücut zırhına kaydırmışlardır (Abteu vd., 2019)

Balistik koruyucu zırhlarda sağlanan üstün özelliklerin yanında bu koruyuculuğu test etmek için birçok standart geliştirilmiştir; en yaygın olarak kullanılan standart NIJ (The US National Institute of Justice - Ulusal Adalet Enstitüsü) tarafından kabul edilen standartlardır (Bozdoğan vd., 2015). Ulusal Adalet Enstitüsü'nün (NIJ) standardına göre vücut zırhı, yumuşak vücut zırhı (koruma seviyeleri I, IIA, II ve IIIA) ve sert vücut zırhı (koruma seviyeleri IIIA, III ve IV) olarak sınıflandırılır (NIJ Standard-0101.06).

Birinci Dünya Savaşı sırasında yumuşak vücut zırhı, ipek kumaş kullanılarak üretilmiştir. Bu zırhlar, çok düşük darbe hızına (120 m/s'ye kadar) sahip mermilere karşı koruma sağlayacak kadar iyiydi ancak daha yüksek çarpma hızına (180 m/s) sahip mermilere karşı yeterince iyi değildi. İkinci Dünya Savaşı sırasında poliamid kumaştan hazırlanan ikinci tür yumuşak vücut zırhı piyasaya sürülmüş ve şarapnel parçacıklarına karşı daha güvenli olduğu görülmüştür. Ancak poliamid esaslı zırhlar tüfek ve tabancalardan çıkan kurşunlara dayanamamıştır (Mawkhlieng vd., 2019). 1990'lı yıllarda ultra-yüksek moleküler ağırlığa sahip polietilen (UHMWPE) lifleri balistik koruma amaçlı üretilen sistemlerde en hafif ve etkin bir çözüm sağlayarak yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır (Bozdoğan vd., 2015).

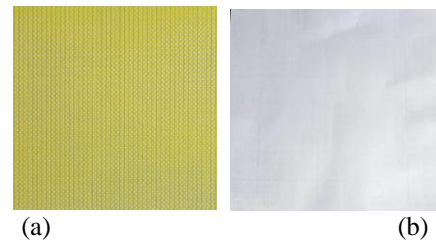
Yıllar geçtikçe yumuşak vücut zırhı sistemlerinin üretimi önemli ölçüde gelişmiştir, ancak bu zırhları iyileştirme ihtiyacı hala devam etmektedir. Yumuşak vücut zırhı sisteminin ağırlığını daha da azaltmak, aynı zamanda uyum ve konfor seviyelerini artırmak için araştırmalar devam etmektedir. Standart bir yumuşak vücut zırhı sisteminin maliyeti birkaç bin dolar civarında olduğundan, ticari açıdan maliyetin düşürülmesi şarttır. Bu zorlu gereksinimler, gelişmiş nano hibrit vücut zırhı yapılarının geliştirilmesiyle karşılanabilir (Crouch, 2019).

Bu çalışmada farklı özelliklere sahip para-aramid ve ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UYMAPE) esaslı balistik koruyucu yumuşak zırh kumaşlarının hafif silahlara karşı koruma seviyeleri test edilmiştir. 6 çeşit yumuşak zırh kumaşı uygun laboratuvar koşullarında NIJ 01.01.04 Seviye IIIA ve STANAG 2920 standartlarında her bir numuneye minimum 6'şar atış yapılarak test edilmiş, kumaşların mevcut üretim koşullarında birim tüketim analizi yapılmıştır.

## 2. MATERYAL VE METOT

### 2.1. Malzeme özellikleri

Deneyisel çalışmalarda Şekil 1'de görülen para-aramid ve ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UYMAPE) esaslı farklı özelliklere sahip kumaşlar kullanılmıştır.



**Şekil 1.** (a) Para-aramid kumaş, (b) Ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen kumaş numuneleri

### 2.1.1. Para-aramid kumaş

Bu çalışmada kullanılan farklı dokuma türlerine sahip para-aramid esaslı kumaşların teknik özellikleri Çizelge 1’de verilmiştir.

**Çizelge 1.** Para-Aramid esaslı yumuşak zırh kumaşlarının teknik özellikleri

Sıra No.	Kumaş Kodu	Kumaş Örgüsü	Birim Alan Kütlesi (g/m <sup>2</sup> )	Kumaş Kalınlığı (mm)	İplik Numarası (denye)	Çözgü Sıklığı (çözgü /cm)	Atkı Sıklığı (atki /cm)
1	A1	1/1 Bezayağı	120	0,16	600	9	9
2	A2	3/1 Z Dimi	415	0,47	2800	6,4	7,2
3	A3	1/1 Bezayağı	400	0,45	3000	6	6

### 2.1.2. Ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen kumaş (UYMAPE-UHMWPE)

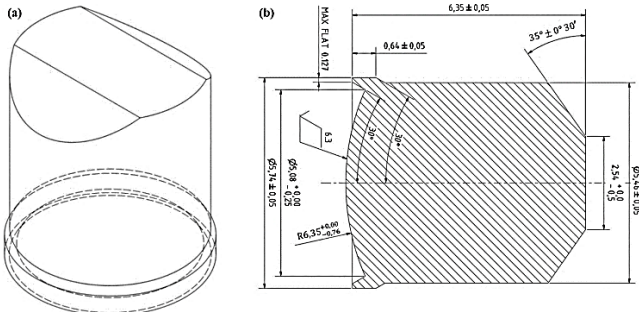
Bu çalışmada kullanılan polietilen esaslı kumaşların teknik özellikleri Çizelge 2’de verilmiştir.

**Çizelge 2.** UYMAPE esaslı zırh kumaşlarının teknik özellikleri

Sıra No.	Kumaş Kodu	Kumaşın Birim Alan Kütlesi (g/m <sup>2</sup> )	Kumaş Kalınlığı (mm)	Katman Sayısı	UD Lif Düzeni
1	SP1	70	0,08	2	0°-90°
2	SP2	165	0,21	4	0°-90°-0°-90°
3	SP3	216	0,25	4	0°-90°-0°-90°

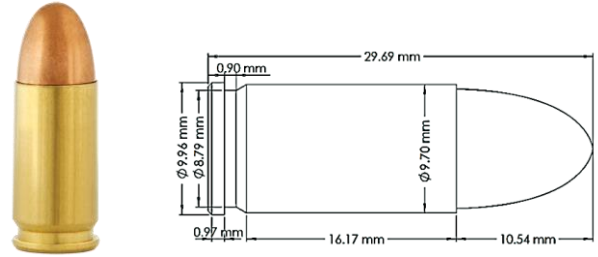
### 2.1.3. Atış testlerinde kullanılan mühimmatların özellikleri

Bu çalışmada atış testleri için farklı özelliklerde mühimmat kullanılmıştır. Atışlarda kullanılan şarapnel parçacıkları, NATO Standardı STANAG 2920’de A3 şarapneli olarak tanımlanmış olan ve boyutları Şekil 2’de görülen 1,1 g (17 grain) malzemedir (Gilson vd, 2023).



**Şekil 2.** (a) STANAG 2920 gereksinimlerine göre FSP parçacığın 3B morfolojisi ve (b) mm cinsinden boyutları

NIJ 0101.04 Seviye IIIA standardı kapsamında Şekil 3’te görülen ve Çizelge 5’te özellikleri belirtilen 9x19 mm kalibreye sahip tamamı metal gömleklili (FMJ) çekirdek delinme/çöküntü testlerinde kullanılmaktadır.



**Şekil 3.** Delinme/çöküntü testlerinde kullanılan 9 mm FMJ RN mermi ve boyutları

Bu çekirdekler taban hariç metal gömlekle kaplanmaktadır. Bu nedenle hedefe ulaşıncaya genişlemezler ve tahribat güçleri yüksektir (Mermilerin Yapısı, 2017).

**Çizelge 5.** Atış testlerinde kullanılan 9 mm x 19 mm FMJ mermiminin teknik özellikleri

Fişek boyu	29,69 mm
Fişek ağırlığı	12-15 g
Basınç	2850 bar
Kuvvet	20,4 kgf
Çekirdek ağırlığı	8 g
Çekirdek çapı	9 mm
Hız	450 m/s
Kapsül	Küresel barut
Çekirdek tipi	Küresel uçlu

## 2.2. Numunelerin hazırlanması

Para-aramid ve UYMAPE esaslı zırh kumaşları 40 cm x 40 cm ebatlarında otomatik serim kesim makinesinde kesilmiştir. Kesilen kumaşlar Çizelge 6’da belirtilen kat sayılarında üst üste dizilip alansal yoğunlukları aşağıda belirtilen formüldeki gibi hesaplanmıştır:

$$\text{Alansal yoğunluk} = \frac{40 \times 40 \text{ cm}^2 \text{ ebatlarındaki yumuşak zırhın ağırlığı (kg)}}{0,16 \text{ (m}^2\text{)}}$$

**Çizelge 6.** Hazırlanan zırh kumaşlarının toplam kat sayıları ve hesaplanan alansal yoğunluk değerleri

Kumaş Kodu	Kat Sayısı	Alansal Yoğunluk (kg/m <sup>2</sup> )
A1	44	5,25
A2	12	5,03
A3	13	5,19
SP1	55	3,81
SP2	25	4,09
SP3	19	4,11

Çizelge 6'da görüldüğü üzere NIJ 0101.04 Standardı Seviye IIIA düzeyinde tabanca/makineli tabanca mermisine karşı korumaya sahip yumuşak zırh elde etmek için;

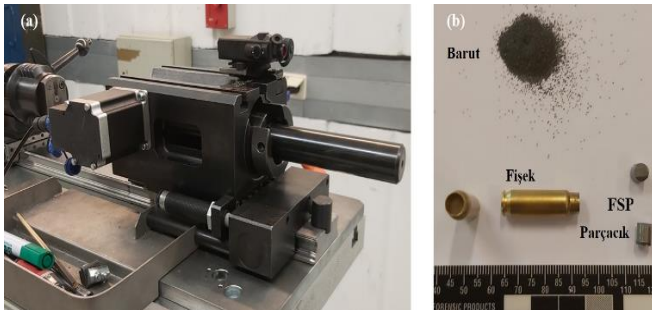
- Para-aramid esaslı zırhlar için 5,03-5,25 kg/m<sup>2</sup>
- UYMAPE esaslı zırhlar için 3,81-4,11 kg/m<sup>2</sup>

alansal yoğunluk aralığında ve kumaş birim alan kütlesine göre 12-55 kat sayısı aralığında zırh sistemleri oluşturulmuştur.

### 2.3. Balistik testlerin yapılışı

#### 2.3.1. STANAG 2920 standardına göre V<sub>50</sub> testleri

Atışlarda NATO Standardı STANAG 2920'de A3 şarapneli olarak tanımlanmış olan ve 5,385 mm çapında 1,102 g (17 grain) şarapnel kullanılır. Belirli bir sayıda atış yapıldıktan sonra, V<sub>50</sub> değeri tam atışlardan en düşük değerli 3 tam delme atış ve en yüksek değerli 3 kısmi delme atışın aritmetik ortalaması alınarak bulunur. Testlerde ortalama almak için kullanılan hızların en yükseği ile en düşüğü arasındaki farkın en fazla 40 m/s olması istenmektedir. Çalışma kapsamında numunelere STANAG 2920'ye göre 1,1 g'lık fragmentlerle atışlar yapılmıştır.



**Şekil 5.** (a) Kullanılan namlu düzeneği ve (b) FSP parçacık ve ivmelenendirici malzemeleri

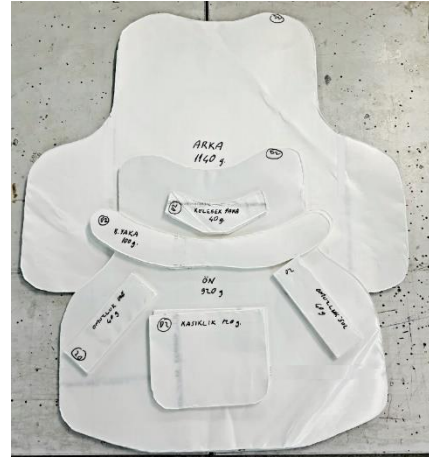
#### 2.3.2. NIJ 0101.04 standardında Seviye IIIA testleri

Balistik test atışlarında kompozit yekek zırh plakasının dış bakan yüzüne, NIJ 0101.04 standardına göre IIIA koruma

seviyesinde 436 ±9,1 m/s hızlarda 5 metre mesafeden atış yapıldığında delinmemesi ve arka kısma yerleştirilmiş olan macun üzerinde en fazla 44 mm deformasyon (çöküntü) olması beklenir.

### 2.4. Kumaşların birim tüketim miktarlarının hesaplanması

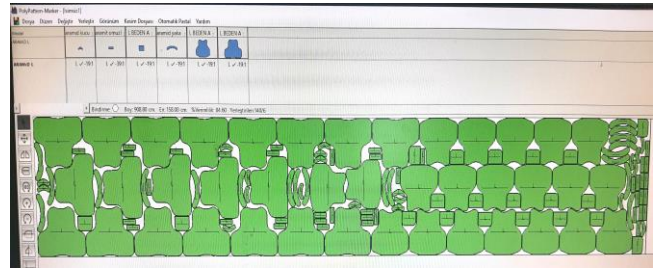
Kumaş tüketimi hesaplanırken Şekil 6'da görülen ve balistik koruyucu yekek üzerinde bulunan ön-arka panel, kasıklık, omuzluk, ön-arka yaka bölgesi zırh parçalarının L bedeninde çizimi oluşturulmuştur.



**Şekil 6.** Balistik koruyucu yekek üzerinde bulunan yumuşak zırh parçaları

Daha sonra Şekil 7'de belirtilen pastal planı aşağıda belirtilen parametreler kullanılarak PolyPattern® CAD-CAM programı yardımıyla oluşturulmuştur.

- Kumaşın kullanılabilir eni: Para-aramid için 127 cm;  
polietilen için 158 cm
- Parçalar arası pay : 0,3 cm
- Pastal payı : 5 cm
- Parça rotasyonu : 90°
- Parça döndürme toleransı : 360°
- Parça takım sayısı : 20 takım L beden
- Pastal çalışma süresi : 120 dk



**Şekil 7.** L beden yumuşak zırh parçalarına ait pastal



### 3. BULGULAR

Bu çalışmada, farklı özelliklere sahip yumuşak zırh kumaşlarına Balistik Direnç Testi (NIJ 0101.04 standardında Seviye IIIA'ya göre delinme testi) ve STANAG 2920 standardına göre  $V_{50}$  testi yapılmış olup; sonuçlar ürün bazında kumaş tüketimleri de hesaplanarak kıyaslanmıştır.

#### 3.1. Balistik direnç testi sonuçları

Testler aşağıda belirtilen koşullarda yapılmıştır. Laboratuvar şartlandırması: Numuneler  $21 \pm 2,9$  °C sıcaklıkta  $\%50 \pm 5$  bağıl nemli ortamda 24 saat bekletildikten sonra

$23 \pm 2$  °C sıcaklıktaki su havuzuna 10 dk. süre ile daldırılarak şartlandırılmıştır.

Namlu tipi : 9 mm LUGER

Mühimmat : 9x19 mm FMJ RN

Mermi hızı :  $436 \pm 9,1$  m/s

Atış mesafesi : 5 m

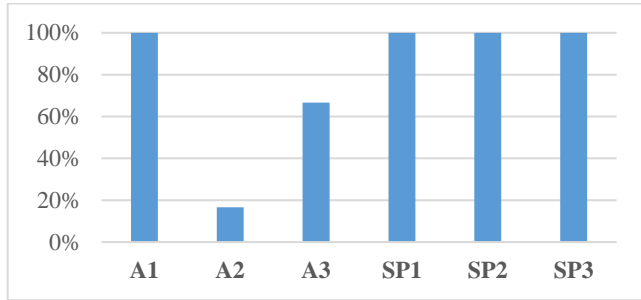
Atış açısı: 1., 2., 3. ve 6. atışlar numune yüzeyine dik açı ile; 4. ve 5. atışlar ise 30° açılı olarak yapılmıştır.

Çizelge 7'de yukarıda belirtilen şartlarda yapılan delinme testi sonuçları görülmekte olup D, atış sonrası zırhta tam delinme olduğunu ifade etmektedir.

Çizelge 7. NIJ 0101.04 standardı Seviye IIIA balistik direnç delinme testi sonuçları

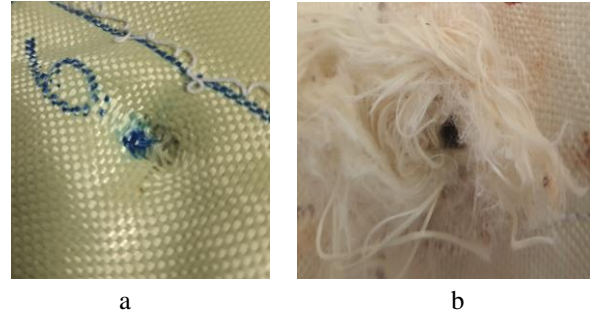
Kumaş Kodu	Mermi Hızı: V (m/s)							Çöküntü değeri: Ç (mm)						
	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>	V <sub>5</sub>	V <sub>6</sub>	V <sub>ort</sub>	Ç <sub>1</sub>	Ç <sub>2</sub>	Ç <sub>3</sub>	Ç <sub>4</sub>	Ç <sub>5</sub>	Ç <sub>6</sub>	Ç <sub>ort</sub>
A1	433	431	437	438	437	438	435,7	25,8	26,5	25,8	22,2	23,2	26,3	25
A2	434	441	443	435	438	444	439,2	29,0	D	D	D	D	D	29,0
A3	436	440	441	435	438	444	439,0	35,7	38,7	40,1	D	D	35,6	37,5
SP1	428	430	428	431	433	438	431,3	27	29,9	30,1	23,2	22,2	27,7	26,7
SP2	435	432	427	430	428	433	430,8	22,5	24,9	25,2	16,4	17	18	20,7
SP3	435	432	427	430	428	433	430,8	25,6	24,6	23,8	20,2	21	17,2	22,1

Üsteki sonuçlara göre kumaşların 6 atışa göre balistik direnç delinme başarı yüzdesi (Şekil 8), enerji sönmleme ve bu değerlere göre Spesifik Enerji Absorpsiyon Değeri hesaplanmıştır (Şekil 11).



Şekil 8. 6/6 atış başarı yüzdesi

Şekil 8'de görüldüğü üzere A2 ve A3 dışındaki 4 yumuşak zırh kumaşı atışlarda %100 başarı göstermiştir. Başarı yüzdesi düşük olan A2 ve A3 para-aramid zırh kumaşlarının birim alan kütlesi  $400 \text{ g/m}^2$  üzerinde olup bu kumaşlar diğer zırh kumaşlarına göre en ağır kumaşlardır.

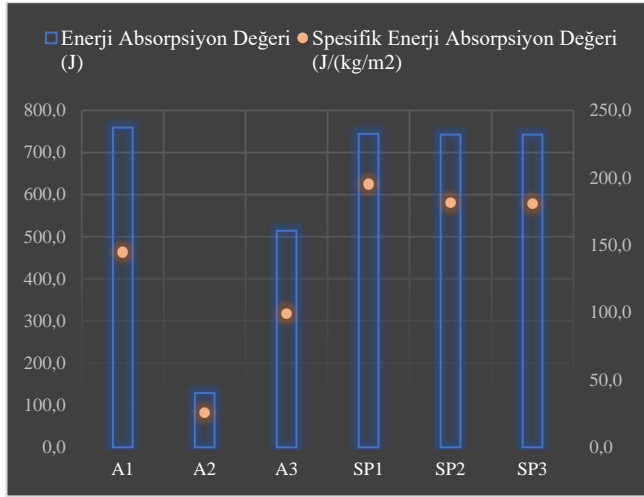


Şekil 9. (a) Delinme olan kumaşın ön yüzeyi ve (b) arka yüzeyi

Şekil 10 radar grafiğinde delinme olmayan yumuşak zırhların arka yüzey çöküntü değerleri incelendiğinde tüm polietilen esaslı zırhların ortalama çöküntü değerleri 20-30 mm aralığında iken; A1 hariç para-aramid esaslı zırhların çöküntü değerleri 25-40 mm aralığındadır. Polietilen esaslı yumuşak zırh grubunun burada daha üstün sonuçlar verdiği görülmektedir.



Şekil 10. Yumuşak zırhların ortalama arka yüzey çöküntü değerleri



Şekil 11. Zırh kumaşlarının enerji sönümlenme ve spesifik enerji absorpsiyon değerleri

Şekil 12'de belirtilen enerji sönümlenme ve Spesifik Enerji Absorpsiyon değerleri aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır.

Enerji Sönümlenme Değeri:

$$E = \frac{1}{2} mV^2 \text{ (Joule)} \times 6/6 \text{ başarı yüzdesi}$$

Spesifik Enerji Absorpsiyon Değeri:

$$SEABS = \frac{\text{Enerji Sönümlenme Değeri}}{\text{Alansal Yoğunluk}} \text{ (J/(kg/m}^2\text{))}$$

Bu formülde;

m: 9 mm FMJ RN mermi çekirdeği kütlesi (0,008 kg)

V: Mermi çekirdeğinin ortalama hızı ( $V_{ort}$ : m/s)

Şekil 11'de bulunan SEABS değerleri incelendiğinde 195,2 J/(kg/m<sup>2</sup>) ile SP1 kodlu polietilen esaslı zırh kumaşı en yüksek değere sahiptir. 70 g/m<sup>2</sup> birim alan kütleli, 55 katlı ve 3,81 kg/m<sup>2</sup> alansal yoğunluğa sahip SP1 zırh sistemi

atışlarda %100 başarı göstererek 744,2 J enerji sönümlenmesi gerçekleştirmiştir. 180 J/(kg/m<sup>2</sup>) üzeri SEABS değerine sahip diğer tüm yumuşak zırh kumaşlarının polietilen esaslı olduğunu görmekteyiz.

Yüksek alansal yoğunluğu değerlerinden dolayı para-aramid zırh sistemlerinin SEABS değerleri polietilen esaslı zırhlara göre düşük kalmıştır.

### 3.2. STANAG 2920 standardına göre V<sub>50</sub> testi sonuçları

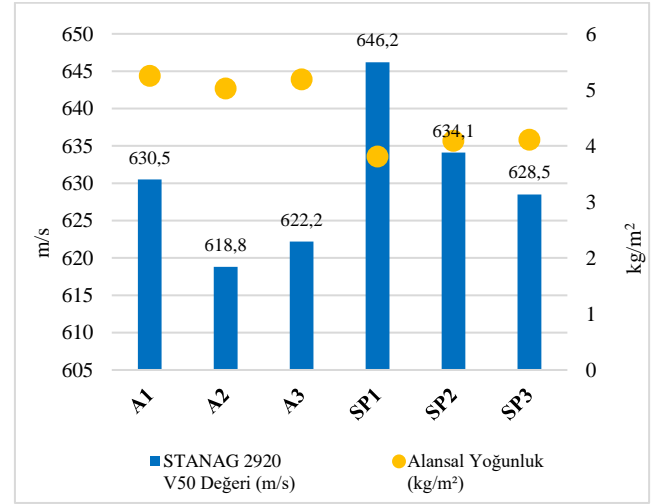
Testler aşağıda belirtilen koşullarda yapılmıştır.

Laboratuvar şartlandırması: Numuneler 20±2 °C sıcaklıkta %40-70 bağıl nemli ortamda 24 saat

Namlu tipi : 5,56 mm NATO

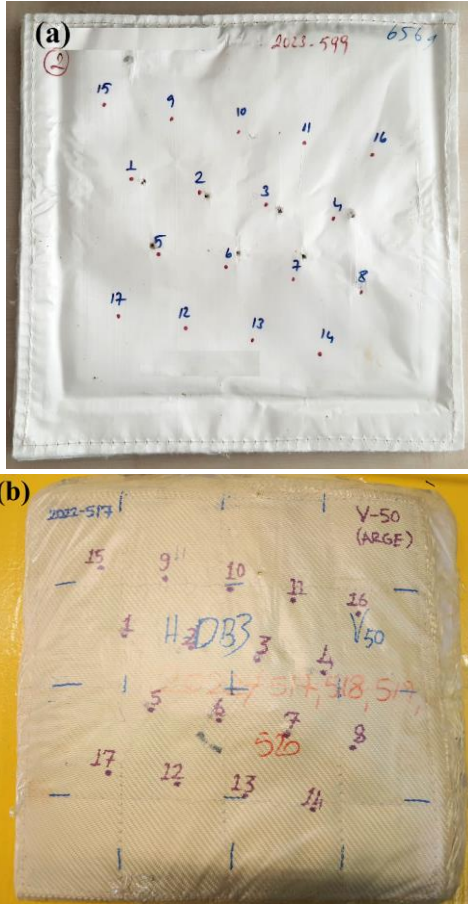
Mühimmat : 1,1 g FSP parçacık

Atış mesafesi : 5 m



Şekil 12. Zırh kumaşlarının V<sub>50</sub> hızları ve alansal yoğunluk değerleri

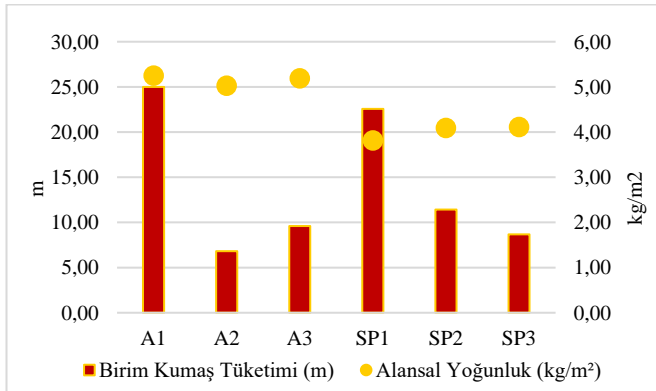
Şekil 12'de görüldüğü üzere polietilen esaslı zırh sistemlerinin V<sub>50</sub> değerleri aramid esaslı zırh sistemlerine göre daha yüksek çıkmıştır. 646,2 m/s V<sub>50</sub> değeri ile en yüksek şarapnel koruması SP1 zırh sisteminde sağlanabilmektedir. Ayrıca polietilen esaslı zırhların alansal yoğunluk değerleri aramid esaslı zırhların alansal yoğunluk değerinden daha düşüktür. Bu da polietilen esaslı zırhların daha hafif olduğu anlamına gelmektedir.



Şekil 13. STANAG 2920 V<sub>50</sub> testi yapılmış olan (a) polietilen esaslı ve (b) para-aramid esaslı zırh kumaşları

### 3.3. Kumaşların birim tüketim sonuçları

Şekil 14’te belirtilen ve koruyucu yelege göre hesaplanan birim kumaş tüketimleri incelendiğinde yüksek birim alan kütlesine sahip kumaşların daha az kat sayıda kullanılmasından dolayı zırh üretiminde tüketimlerinin de düşük olduğunu görebilmekteyiz. Ancak delinme testine göre başarılı olan kumaşları incelediğimizde en az kumaş gereksinimi olan zırhların sırasıyla SP3 ve SP2 olduğu görülmektedir. Alansal yoğunluk değerlerine bakıldığında yine polietilen grubunun hafiflik ve tüketim alanlarında avantajlı olduğu görülmektedir.



Şekil 14. Zırh kumaşlarının birim tüketim ve alansal yoğunluk değerlerinin kıyaslanması

## 4. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bu çalışmada 6 çeşit yumuşak zırh kumaşı uygun laboratuvar koşullarında NIJ 01.01.04 Seviye IIIA ve STANAG 2920 standartlarında minimum 6’şar atış yapılarak ve bu ürünlerin eğilme direnci açısından konfor düzeyleri belirlenerek test edilmiştir. Bunun yanında kumaşların mevcut üretim koşullarında birim tüketim analizi yapılmıştır.

Delinme/çöküntü değerleri açısından bakıldığında; uluslararası geçerliliği olan NIJ 01.01.04 Seviye IIIA standartlarına göre, 6 atışın tamamında tam delinmenin olmadığı ve vücut travma sınırı olan maksimum 44 mm çöküntü şartının altında veri kaydedilen zırh sistemleri A1, SP1, SP2 ve SP3’tür. Para-aramid kumaş grubunda tam delinme saptanan A2 ve A3 zırhlarına bakıldığında bu kumaşların birim alan kütlelerinin diğerlerine göre oldukça yüksek olduğu görülmektedir (>400 g/m<sup>2</sup>). Başarılı sonuçlar daha çok birim alan kütlesinin 220 g/m<sup>2</sup>’den düşük ve kumaş kat sayısının daha çok olduğu durumlarda elde edilmiştir. Çöküntü değeri kıyaslaması yapıldığında polietilen (UHMWPE) esaslı yumuşak zırh grubunun daha başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür.

Yumuşak zırhlar için V<sub>50</sub> hız değeri müşteri firma/birlik ihtiyacına göre değişkenlik göstermekte olup genelde talep edilen V<sub>50</sub> değerleri 620-650 m/s’dir. Minimum V<sub>50</sub> hız değeri olarak 620 m/s değerini baz alırsak çalışma yapılan kumaşlardan A1, A3, SP1, SP2, SP3 zırhlarının şarapnel parçalarına karşı koruyuculuğu uygundur. Genel olarak çalışma yapılan polietilen esaslı zırh sistemlerinin V<sub>50</sub> değerleri para-aramid esaslı zırh sistemlerine göre daha yüksektir.

Dokuma kumaş olan para-aramid zırh gruplarının alansal yoğunlukları dolayısıyla ağırlıkları polietilen esaslı zırhlara göre yüksektir. Polietilen esaslı zırh sistemleri daha hafiftir.

Birim kumaş tüketimi açısından bakıldığında, yüksek birim alan kütlesine sahip kumaşların daha az kat sayısında kullanılmasından dolayı zırh üretiminde tüketimleri daha düşüktür. Ancak bu ürünlerin kullanım rahatlığının daha düşük olduğu söylenebilir.

Bu çalışmada bulunan tüm veriler incelendiğinde balistik koruyuculuğu olan bir yumuşak zırh kullanımı için aşağıdaki kriterlere göre tercih edilebilecek en uygun ürünler şunlardır:

- Ağırlık/hareket kabiliyeti/konfor/balistik değerler beraber düşünüldüğünde; SP1
- Balistik delinme testlerinde çöküntü değerleri en düşük; SP2
- V<sub>50</sub> değeri/şarapnel koruyuculuğu en yüksek: SP1
- Birim kumaş tüketimi en az olan; SP3

Bu çalışma kapsamında bir genelleme yapılması istenirse aynı koruma düzeyinde;

- ✓ En hafif zırh grubu polietilen (UYMAPE-UHMWPE) esaslı yumuşak zırh sistemleridir.
- ✓ En düşük maliyetli zırh grubu polietilen (UYMAPE) esaslı yumuşak zırh sistemleridir.
- ✓ Çevresel şartlara en dayanıklı ve en konforlu zırh grubu, para-aramid esaslı yumuşak zırh sistemleridir.

## KAYNAKLAR

- Abteu MA, Boussu F, Bruniaux P, Loghin C, Cristian I. (2019). Ballistic impact mechanisms – a review on textiles and fibre-reinforced composites impact responses. *Compos Struct*, 223:110966.
- Anand B., S. Arulvel, Jayakrishna K, (2023). Significance of ballistic parameters and nanohybridization in the development of textile-based body armor: A review, *International Journal of Impact Engineering*, Volume 180, 104700, ISSN 0734-743X
- Azrin Hani AR, Roslan A, Mariatti J, Maziah M. (2012). Body armor technology: a review of materials, construction techniques and enhancement of ballistic energy absorption. *Adv Mater Res*:806–12.
- Crouch IG. (2019). Body armour - new materials, new systems. *Def Technol*;15:241–53.
- Gilson, L., Coghe, F., Bernardi, A., Imad, A., Rabet, L. (2023). Ballistic limit evolution of field-aged flexible multi-ply UHMWPE-based composite armour inserts, *Composite Structures*, Volume 322.
- Kędzierski, P., Andrzej Morka, A. (2022). A comprehensive approach to the modeling and simulation of ballistic textiles, *Composite Structures*, Volume 292.
- Mawkhlieng U, Majumdar A, Laha A. (2019). A review of fibrous materials for soft body armour applications. *RSC Adv*.10:1066–86.
- Mermilerin Yapısı, (2017). Tamamen metal gömlekli mermiler. <https://www.paganx.org/mermilerin-yapisi>. Erişim tarihi: 13 Ekim 2023.
- NIJ Standard-01.01.06 - Ballistic Resistance of Personal Body Armor.