

## KOLLOİDAL SİLİKA DİSPERSİYONUNUN POLİETİLEN DOKUSUZ YÜZEYİN ENERJİ ABSORBSİYONUNA OLAN ETKİSİ

*İdris ÇERKEZ\**

*Yusuf ULCAI\**

**Özet:** Bu çalışmada kolloidal silika dispersiyonunun farklı gramajlardaki dokusuz yüzey tela malzemesinin enerji absorpsiyonuna olan etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla; üç farklı gramajdaki (18, 28 ve 45 gr/m<sup>2</sup>) tela malzemeleri beş farklı konsantrasyondaki (0,20, 30, 40 ve 50 gr/lit) silika dispersiyonu ile emdirilerek gramaja ve konsantrasyona bağlı olarak telanın enerji absorpsiyonundaki değişim ölçülmüştür. Çalışma sonuçlarına göre silika konsantrasyonunun ve tela gramajının artışıyla birlikte enerji yutumunun arttığı görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Balistik Darbe, Kolloidal Silika Dispersiyonu, Enerji Absorpsiyonu.

### The Effect of Colloidal Silica Dispersions on the Energy Absorption of Polyethylene Nonwoven

**Abstract:** In this study, the effect of colloidal silica dispersions on the energy absorption of different weight in grams polyethylene nonwoven interfacing material is investigated. By this aim; three different (18, 28 ve 45 gr/m<sup>2</sup>) weight in grams interfacing materials are padded with five different concentrated (0,20, 30, 40 ve 50 gr/lit) silica dispersions so the variation of interfacing material's energy absorption is measured. According to research results, interfacing material's energy absorption increases with the increase in silica dispersions concentration and the weight in grams of interfacing material.

**Key Words:** Balistic Impact, Colloidal silica dispersion, Energy Absorption.

## 1. GİRİŞ

Geçmişten günümüze insanoğlu, bir yandan daha gelişmiş silah arayışı içindeyken bir yandan da bu silahlara karşı korunma çareleri aramıştır. Bu arayış doğrultusunda her türlü patlayıcı, delici, kesici tehlikelere karşı insanları ve donanımları koruma amacı taşıyan giysiler balistik zırh adı altında kullanılmaya başlamıştır.

İnsanoğlu, savaş ve diğer tehlikeli durumlara karşı kendini koruyabilmek amacıyla birçok malzeme kullanmıştır. İlk koruyucu giysi ve zırhlar hayvan derilerinden yapılmıştır. Uygarlıklar geliştikçe tahta ve metal zırhlar kullanım alanı bulmaya başlamıştır. Metaller, ortaçağ şövalyeleri tarafından koruyucu giysi olarak da kullanılmışlardır. Aslında ilk kurşungeçirmez zırh, duvar ve taşlardan oluşturulan suni bariyerlerdir; taş, ağaç ve hendeklerden oluşan doğal bariyerlerdir. ([http://www.leonuniform.com/BodyArmor\\_History.htm](http://www.leonuniform.com/BodyArmor_History.htm)).

Yumuşak zırhlara ait ilk kayıtlı örnek, ipekten yapılmış zırh kullanan ortaçağ Japonlarına aittir. 19.yy'ın sonlarına doğru ordu, yumuşak zırhın kullanabilinme olasılığını keşfetmiştir. Bu tür zırhlar düşük hızlı mermilere karşı koruma sağlayabilirken yeni kuşak silahlara karşı güvenli bir koruma sağlayamamaktadırlar.

1931 yılında polis çalışanları için vücut zırhı geliştirilmiştir. İkinci dünya savaşı sırasında uçaksavar ceketi (flak jacket) askeri kullanım amacıyla geliştirilmiştir. Bu giysilerde naylon lifleri kullanılmış olup; oldukça ağır, kullanışsız ve etkisiz kalmışlardır. 1960'ın sonlarına doğru yeni liflerin gelişimiyle birlikte gizlenebilir vücut zırhlarının kullanımı gerçekleştirilmiştir.

1960'lı yıllarda NIJ (National Institute of Justice) tarafından polislerin giyebileceği hafif ağırlıklı vücut zırhı üretebilmek amacıyla araştırmalar başlatılmıştır. 1970 yılında, Dupont firması tarafından üretilen Kevlar® esaslı kurşungeçirmez yelek, balistik korumada büyük ilerleme kaydetmiştir.

\* Uludağ Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Tekstil Mühendisliği, 16059, Bursa.

1971 ve 1976 yılları arasında vücut zırhı gelişimi için NIJ tarafından 4 ayrı bölümden oluşan 3 milyon dolarlık bir yatırım yapılmıştır. Araştırmanın birinci bölümünü, Kevlar®'ın mermiyi tutup tutamayacağını test edilmesi oluşturmaktadır. İkinci bölüm ise, farklı çap ve hızdaki mermilerin penetrasyonunun engellenebilmesi için gerekli olan katman sayısının analizini kapsamaktadır. Medikal testler ise araştırmanın üçüncü bölümünü oluşturmaktadır. Burada, hayati tehlikeyi ortadan kaldıracak vücut zırhı seviyesinin araştırılması yapılmıştır. Dördüncü bölümde ise vücut zırhının giyilebilirliği, konforu ve etkinliği ele alınmıştır (Muszynski, 2004).

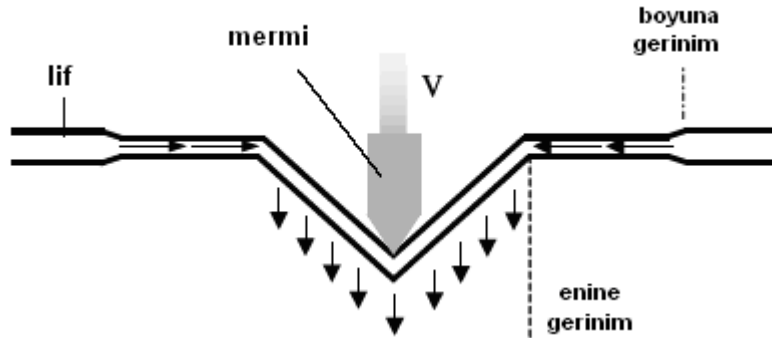
1980'lerde yüksek yoğunluklu polietilen liflerinden geliştirilen lifler ve daha sonraları poli-p-fenilenbenzobisoksazol liflerinden geliştirilen yapılar balistik koruyucu amaçlı giysilerde kullanılmaya başlanmıştır.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

### 2.1. Balistik Darbe Mekanizması

Balistik koruyucu malzemeler sert ve yumuşak koruyucular olmak üzere ikiye ayrılmışlardır. Cam, seramik ve metalden yapılan sert koruyucular zırh, koruyucu başlık, kalkan ve plaka olarak kullanılmaktadırlar. Yumuşak koruyucular ise kumaş ve kumaş benzeri yapılardan oluşan polimer esaslı malzemelerdir (Temiz, S., 2005).

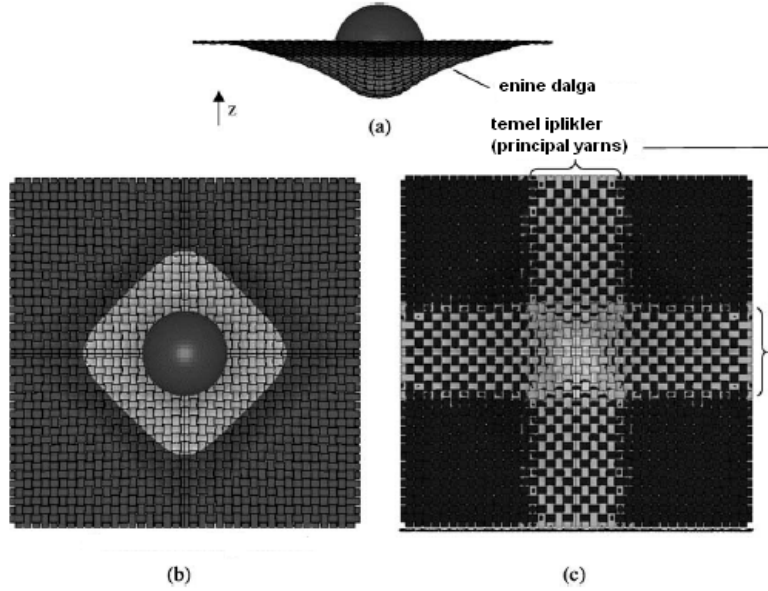
Kumaşa meydana gelen darbe olayını analiz edebilmek amacıyla tek bir lifte gerçekleşen darbe olayı incelendiğinde; merminin life çarpmasından sonra enine ve boyuna olmak üzere darbe noktasından yayılan iki tip dalganın oluştuğu görülür. Boyuna çekme dalgası malzemenin ses hızında lif eksenine boyuna hareket etmektedir. Çekme dalgası darbe noktasından yayıldıkça, çarpan merminin hareket doğrultusunda eğilen materyal darbe noktasına doğru akmaktadır. Malzeme hızından daha düşük bir hızda yayılan bu enine yönde olan hareket ise enine dalga olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 1:  
Tek bir lifte gerçekleşen darbe (Cheeseman ve diğ., 2003)

Tek katmanlı bir kumaşın darbe etkisi altındaki deformasyonun incelenmesi, kumaşın balistik performansını etkileyen fiziksel mekanizmaların ortaya çıkarılmasında ve incelenmesinde yardımcı olacaktır. Tek katmanlı bir kumaşın enine darbesi ile tek bir lifin enine darbesi arasındaki benzerliğe dayanarak; bir merminin kumaşa çarptığında, mermi ile temas eden temel ipliklerde enine yönde bir eğilmenin meydana gelmekte ve iplik eksenine boyunca malzemenin ses hızında yayılan boyuna gerinim dalgası oluşmaktadır. Bununla birlikte temel ipliklerle kesişen ortogonal iplikler, temel iplikler tarafından orijinal kumaş düzleminde dışarıya doğru çekilmektedirler. Bu ortogonal iplikler deformasyona uğramakta ve temel ipliklerde olduğu gibi gerinim dalgası geliştirmektedirler. Benzer şekilde bu ortogonal iplikler kendileriyle kesişen iplikleri zorlamaktadırlar. Birbirleri arasındaki sürtünmenin fonksiyonu olan bu iplik-iplik etkileşimi, darbe noktasında ortogonal ipliklerin düzensizliği şeklinde oluşan eğilme meydana getirmektedir. Bu enine eğilme darbe noktasında gerininin kopma gerinim değerine ulaşmasına kadar devam etmektedir. Nümerik olarak yapılan analizlerde merminin kinetik enerjisinin büyük bir bölümünün gerinim ve kinetik enerji olarak temel ipliklere transfer edildiği; ortogonal ipliklerin enerji absorpsiyonuna olan katkılarının oldukça

az olduğu ortaya çıkarılmıştır. Bu durum şekil 2’de; temel ipliklerin oldukça gerilmiş bir halde; ortogonal ipliklerin ise daha gevşek bir durumda durmalarından da anlaşılmaktadır. Ayrıca ortogonal iplikler tek bir lifin darbesinde gözükten V-biçimli enine dalga formunu da daha parabolik bir forma sokmuştur (Cheeseman ve diğ., 2003).



Şekil 2:

*Tek katmanlı bir kumaşta meydana gelen darbenin yandan, üstten ve alttan görünüşü (Cheeseman ve diğ., 2003)*

## 2.2. Balistik Darbe Esnasında Gerçekleşen Enerji Transferi

Mermi kumaşa çarptığında; kumaş tarafından merminin hızını azaltan bir kuvvet uygulanır. Aynı zamanda kumaşta da deformasyon meydana gelir. Darbe noktasından kumaş kenarlarına doğru gerinim dalgaları iplik boyunca yayılma gösterir. Darbe sistemi üzerine etkili olan herhangi bir dış kuvvet yoksa sistem içindeki enerji absorbe edilecektir. Mermi deformasyonu için harcanan enerji, lif molekülleri arasındaki sürtünme, hava sürtünmesi ve akustik kayıplar ihmal edildiğinde merminin kinetik enerjisindeki kayıp ( $\Delta E_{pk}$ ); iplik gerinim enerjisi ( $E_{ys}$ ), iplik kinetik enerjisi ( $E_{yk}$ ) ve sürtünmeli kaymada harcanan enerji ( $E_f$ ) olmak üzere 3 mekanizma doğrultusunda absorbe edilecektir. Dolayısıyla kumaş ve mermi arasındaki enerji transferi şu eşitlikle karakterize edilebilir;

$$\Delta E_{pk} = E_{ys} + E_{yk} + E_f \quad (1)$$

Merminin kinetik enerjisindeki kayıp ( $\Delta E_{pk}$ ); malzemeyi oluşturan lif özellikleri, kumaş yapısı, mermi geometrisi, darbe hızı, mermi ve kumaş arasındaki sürtünme, iplikler arası sürtünme gibi birçok faktöre bağlıdır (Duan ve diğ., 2006).

## 2.3. Balistik Tekstillerde Kullanılan Lifler

Balistik koruma amaçlı kullanılan ilk lif poliamid lifleridir. Kevlar®, Twaron® gibi aramid poliamidler ve Spectra®, Dyneema® gibi yüksek yoğunluklu polietilen lifleri balistik korunmada kullanılan temel malzemelerdir. Bununla birlikte Vectran lifleri, PBO lifleri, karbon nano tüpler ve örümcek ipeği liflerinin balistik korunmada kullanılabilirlikleri günümüz araştırma konularındandır. Kompozit panellerde ise; karbon, cam ve seramik lifleri kullanılmaktadırlar ve poliamid, polyester ve polipropilen lifleri kompozit panellerin bileşenleri olarak kullanım alanı bulmaktadırlar ([http://tubitaktam.ege.edu.tr/dosyalar/balistik\\_lifler.pdf](http://tubitaktam.ege.edu.tr/dosyalar/balistik_lifler.pdf)). Tablo 1’de balistik korunmada kullanılan bazı liflerin özellikleri verilmiştir.

**Tablo 1.**  
**Balistik korumada kullanılan lifler (Jacobs,2001)**

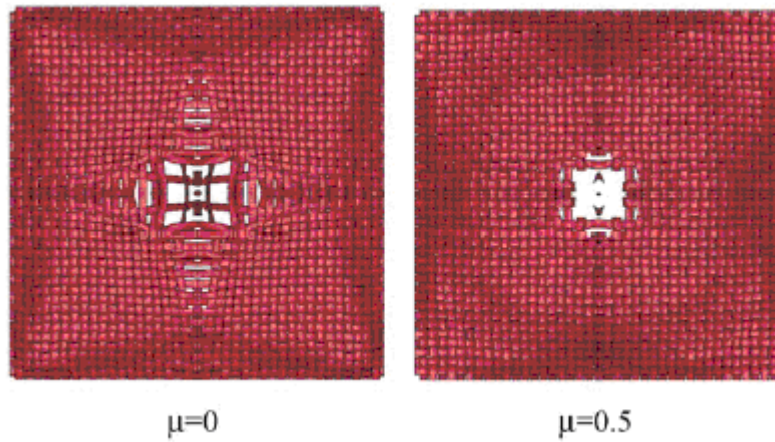
	Mukavemet (GPa)	Modül (Gpa)	Kopma Mukavemeti (%)
Aramid	2.8-3.2	60-115	1.5-4.5
HPPE	2.8-4	90-140	2.9-3.8
LCP	2.8	65	3.3
PBO AS	5.5	280	2.5
M5	4	330	1.2
Cam Lifi	4.65	87	5.4

## 2.4. Balistik Performansı Etkileyen Mekanizmalar

### 2.4.1. Sürtünme

Sürtünme, balistik kumaşların darbe direncine doğrudan ve dolaylı olarak etki etmektedir. Delinmenin gerçekleşmediği bir sistemde iplik çekmeleri enerji absorpsiyonunda doğrudan etkili olmaktadır. Bununla birlikte absorblanan enerji miktarında mermi-kumaş ve iplik-iplik sürtünmesi de büyük önem taşımaktadır. İpliklerin yanal hareketi reçine absorpsiyonuyla sınırlandırılarak balistik performansın artırılabilineceği deneysel olarak kanıtlanmıştır. Çünkü mermi ile kumaş arasındaki sürtünme ve iplik-iplik sürtünmesi artırılarak ipliklerin hareketi kısıtlanmakta ve dolayısıyla mermi iplikleri koparmaya zorlayacağı için absorblanan enerji miktarı artmaktadır. Sürtünme bu yolla enerji absorpsiyonuna dolaylı olarak etki etmektedir. Yapılan bir çalışmada yüzey aktif madde ilavesiyle farklı lif-iplik sürtünmesine sahip kumaşlar elde edilerek balistik teste tabi tutulmuş ve enerji absorpsiyonunun bir göstergesi olarak merminin kalan hızı ölçülmüştür. Sonuçta sürtünmenin artmasıyla birlikte perforasyon için gerekli olan hızın arttığı ve kalan hız değerinin ise düştüğü ortaya çıkarılmıştır. Yani, sürtünmesi daha fazla olan kumaşta daha yüksek enerji absorpsiyonu gerçekleşmektedir. Deneysel olarak yapılan diğer bir çalışmada ise suyun balistik performans olan etkisi incelenmiştir ve ıslak numunelerde perforasyon meydana gelirken kuru numunelerde herhangi bir delinme meydana gelmediği görülmüştür. ıslak numunelerde ipliklerde kopma gerçekleşmemiş olmasına ipliklerin yatay hareketi nedeniyle mermi kumaş içinden geçmiştir. Bu çalışmanın ışığı altında suyun mermi ile iplik arasındaki sürtünmeyi azaltan bir yüzey aktif madde gibi davrandığı ortaya konulmuştur (Cheeseman ve diğ., 2003).

Duan ve arkadaşları (2006) sürtünme katsayısına bağlı olarak merminin kalan hızını nümerik olarak hesaplamışlardır. Buna göre sürtünme katsayısı  $\mu=0,5$  iken merminin çıkış hızı 749m/s iken; sürtünme katsayısı 0 olduğunda mermi 769 m/s'lik bir çıkış hızına ulaşmaktadır.



*Şekil 3:*  
*Sürtünme katsayısının kumaş deformasyonuna olan etkisi (Duan ve diğ, 2006)*

#### 2.4.2. Malzeme Özellikleri

Darbeyle birlikte, büyük bir kısmı darbe hızına bağlı olarak ipliklerde ani bir gerginlik artışı yaşanmaktadır. Kritik hızın altındaki düşük hızlarda bu başlangıç gerginlik artışı iplikleri koparacak yetkinlikte olmadığı için enine yönde eğilme meydana gelmekte ve iplikler uzayarak enerji absorblanabilmektedir. Yani yüksek çekme mukavemetine ve yüksek kopma gerinimine sahip olan lif takımları daha fazla enerji absorbsiyonu yapabilmektedirler. Yapılan çalışmalarda enerji absorbsiyonuyla kopan lif sayısı arasında bir korelasyon geliştirilmiştir ki lif gerinimi balistik bir kumaşın enerji absorbsiyonundaki temel mekanizmasıdır. Ayrıca %50 perforasyon olasılığının olduğu hız değeri olarak tanımlanan V50 balistik hızın üzerindeki hız değerlerinde kumaşlarda başlangıçtaki ani gerginlik artışı esasında perforasyon gerçekleşmektedir. Çünkü enine eğilmenin yayılması için gerekli olan sürenin yetersizliği nedeniyle lif gerinimi azalmakta ve sonuç olarak kumaşın absorbladığı enerji miktarı daha düşük olmaktadır (Cheeseman ve diğ., 2003).

Mermi balistik yapıya vurduğu anda liflerde boyuna ve enine yönde gerilim dalgalarına sebep olur. Boyuna yönde oluşan gerilim dalgalarını:

$$c = (E / \rho)^{0,5} \quad (2)$$

Şeklinde ifade edilebilir. Bu formülde;

c: Boyuna yönde gerilimin dalga hızı

E: Lifin elastisite modülü

$\rho$ : İpliğin yoğunluğu'nu ifade etmektedir.

Boyuna yönde dalga hızı ne kadar yüksek olursa merminin çarpma enerjisi o kadar hızlı yayılır. Ayrıca yapı içindeki ipliklerin birbirleriyle bağlantıları sonucu, oluşan dalga diğer ipliklere iletilir. Burada lifin elastiklik modülü ne kadar yüksek olursa, oluşacak deformasyonun dağılması, yayılması o kadar hızlı olmaktadır (Temiz, 2005).

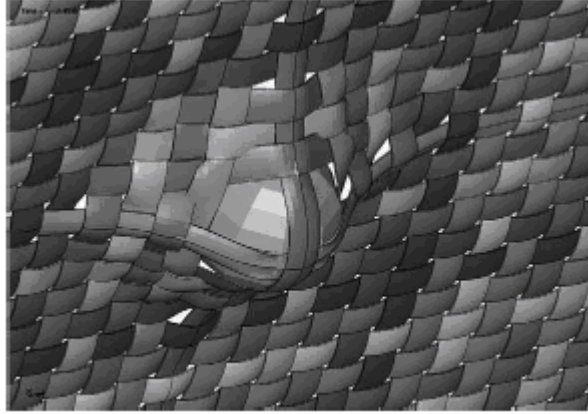
Çekme mukavemetinin, modülün ve kopma gerilmesinin kumaşın balistik performansında etkisi tek başına düşünülmemeli. Eğer balistik performans sadece ipliğin tokluğuna bağlı olsaydı, düz zincir poliamidlerin aramid poliamidlere göre daha iyi bir performans göstermesi gerekirdi. Spesifik lif tokluğu lif gerinim dalga hızıyla çarpılarak boyutsuz lif özelliği ( $u^\circ$ ) türetilmiş ve balistik performansın bütün bu özelliklere bağlı olduğu ancak yalnızca bu özellikler göz önüne alınarak değerlendirilemeyeceği ortaya konulmuştur (Temiz, 2005).

$$u = (\sigma * \epsilon / 2\rho) * (E / \rho)^{0,5} \quad (3)$$

Bu formülde  $\sigma$  lifin maksimum çekme mukavemetini,  $\epsilon$  lifin maksimum gerinim değerini,  $\rho$  yoğunluğu E ise modülü ifade etmektedir

#### 2.4.3. Kumaş Özellikleri

Balistik uygulamalarda genelde bezayağı ve sepet örgüler kullanılmaktadır. Örtme faktörü olarak tanımlanan doku yoğunluğu çözgü ve atkı ipliklerinin sıklıkları tarafından belirlenmektedir. Balistik uygulamalarda kullanılacak olan kumaşların örtme faktörünün 0,6 ile 0,95 arasında olmalıdır. Çünkü, örtme faktörü 0,95'den büyük olduğunda iplikler dokuma esnasına bozulmakta; 0,6'dan küçük olduğunda ise kumaş çok gevşek bir yapıya sahip olmaktadır (Cheeseman ve diğ.,2003). Gevşek dokunmuş kumaşlarda perforasyon olasılığı artmaktadır. Şekil 4'de gözüktüğü üzere mermi kumaş katmanına çarptığında kumaşta enine yönde eğilme olmakta iplikler arasındaki boşlukların büyümesine yol açan iplik ağı şişmeleri meydana gelmektedir. Eğer mermi çok küçükse ve/veya belli bir açı ile çarparsa ve/veya merminin önündeki ipliklerde kırılma meydana gelirse; mermi iplikleri koparmak yerine ittirecek ve oluşan boşluktan geçebilecektir.



Şekil 4:  
Darbe altında kumaş görünüşü (Cheeseman ve diğ., 2003)

Balistik performansı etkileyen kumaş özelliklerinden biri de kıvrımdır. Kıvrım; ipliklerin dokunmuş kumaş yapısındaki konumlanmalarından kaynaklanan dalgalanmadır. Bezayağı bir örgüde, kıvrım derecesi dengelenmemiştir (çözgü ipliklerinin kıvrımı atkı ipliklerine göre daha fazladır). Balistik korumada yüksek kopma uzamasına sahip olan atkı iplikleri kullanılmalıdır. Çünkü atkı iplikleri daha az kıvrıma sahip oldukları için çözgü ipliklerine göre daha önce kopuşa uğramaktadırlar. Çözgü iplikleri sahip oldukları yüksek kıvrımın açılması için zamana ihtiyaç duymaktadırlar. Yüksek kopma uzamasına sahip olan atkı ipliklerinin balistik performansının arttığı deneysel olarak ispatlamıştır (Cheeseman ve diğ., 2003).

#### 2.4.4. Mermi Geometrisi

Mermi geometrisi, merminin kumaşı perforasyonuna etki eden en temel unsurların başında gelmektedir. Tan ve ark (2005) bezayağı örgülü Twaron® kumaşı üzerinde düz, yarıküre, oval ve konik uçlu mermi ile yaptıkları deney sonucunda konik ve oval uçlu mermilerde çok az iplik kopuşunun olduğunu ve merminin doku içerisinde kayarak ilerlediğini görmüşlerdir. Bu tür mermilerle yapılan çalışmalarda sırasıyla 58 ve 76 m/s gibi düşük V50 değeri elde edilmiştir. Düz uçlu mermilerde kumaşı kalınlık boyunca kesmeye zorladığı için 100 m/s V50 değeri elde edilmiştir. Bununla birlikte yarıküreli mermide en fazla lif kopuşu gerçekleşmiş ve dolayısıyla 159 m/s gibi yüksek V50 değeri elde edilmiştir.

Keskin uçlu mermilerde veya yüksek hıza sahip mermilerde, kumaş kalınlığı boyunca lifleri keserek kumaşa saplanma gerçekleşmektedir (Cheeseman ve diğ., 2003).

#### 2.4.5. Çarpma Hızı

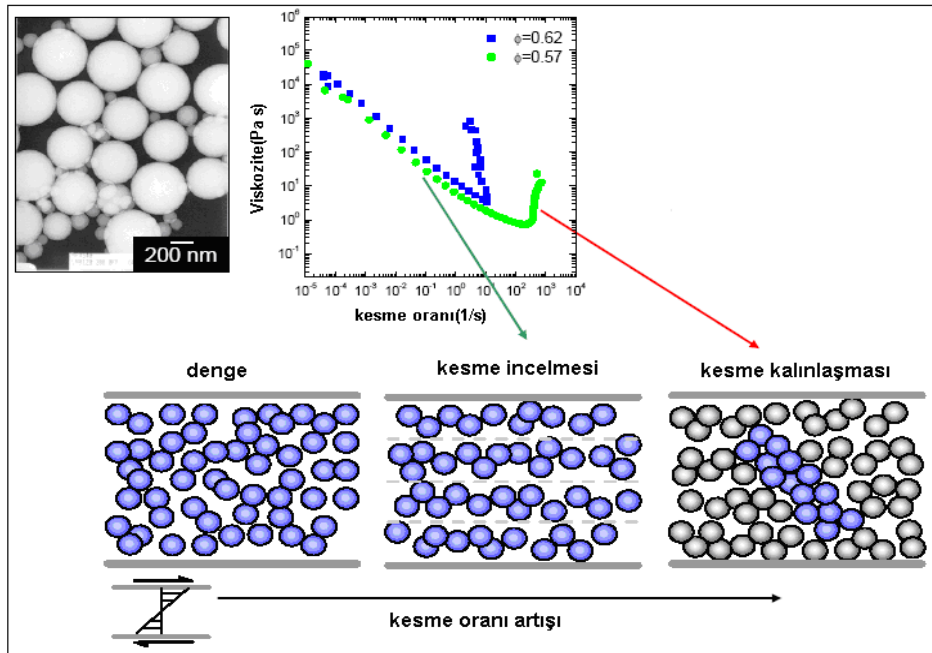
Merminin çarpma hızının balistik performansa etkiyeceği aşikârdır. Fakat bununla birlikte farklı hızlarda gerçekleşen mekanizmanın incelenmesi gerekir. Daha önceden de belirtildiği üzere keskin uçlu ve yüksek hıza sahip olan mermiler kumaş kalınlığı boyunca lifleri uzatıp koparmaya zorlamak yerine keserek kopuşa neden olmaktadır (Ani bir şekilde kopmaya yol açan hız değeri kritik hız olarak tanımlanmaktadır). Düşük hız ve yüksek hız çarpmaları üzerine yapılan bir araştırma sonuçlarına göre düşük hızlı çarpmalarda ani gerilim artışında iplikte bir kopuş olmamaktadır. Bu nedenle enine eğilme kenarlara kadar ulaşabilme imkânı bulabilmektedir. Düşük hız çarpmaları enerji dağılımını kolaylaştıran geniş eğilme ve gerilme davranışı ile karakterize edilirler. Yüksek hızlı çarpmalarda ise bölgesel hasar meydana gelmekte ve belirli enine eğilme oluşmadan iplikte kopuşlar meydana gelmektedir. Yüksek hızlı çarpmalarda bir takım potansiyel mekanizmalar da gerçekleşmektedir. Tek lif Kevlar® ve UHMWPE lif üzerinde yapılan bir araştırmaya göre yüksek hızlarda liflerde kesilme meydana gelmekte ve üstelik UHMWPE liflerinde erime hasarları oluşmaktadır. Benzer sonuçlar PBO ve Dyneema® liflerinde de elde edilmiştir. Naylon panellerde balistik darbe esnasında filamentlerde yumuşama, erime, ayrışma olma, yanma ve fibrilasyon meydana gelmektedir. Lastikleri yüksek hızlı çarpmalarda korumak amacıyla geliştirilen tampon amaçlı kevlar-epoksi kompozitinde 788 m/s hızında gerçekleşen bir çarpışmada Kevlar®-Epoksi kompozitinde faz değişimine maruz kaldığını, termal bozunmaya uğrayarak bütün epoksinin buharlaştığını ortaya çıkarmışlardır (Cheeseman ve diğ., 2003).

### 2.4.6. Katman Sayısı

Katlı yapılar ciddi tehlike tipleri için geliştirilmekte ve bu yapıların temelde lif tipi, reçine tipi, doku konstrüksiyonu, kat sayısı, iplik yönü ile kesişmeleri ve iplik setleri ile yoğunluğu gibi parametrelere bağlı olarak değerlendirilmesi gerekmektedir. Vurmanın katlı yapılara etkisi katı ve esnek tiplerine bağlı olarak değişmekte, katlı yapılar için katlar arası açılmanın bozulma modu olduğu ve bunun enerjinin dağıtılması açısından olumlu ancak yapının dayanımı açısından negatif olarak etkilediği iddia edilmiştir. Katlı yapıların ağırlığı ve konforunun da tehlike tipine bağlı olarak göz önüne alınması gerekir (Temiz, 2005).

### 2.5. Kolloidal Silika Dispersiyonu

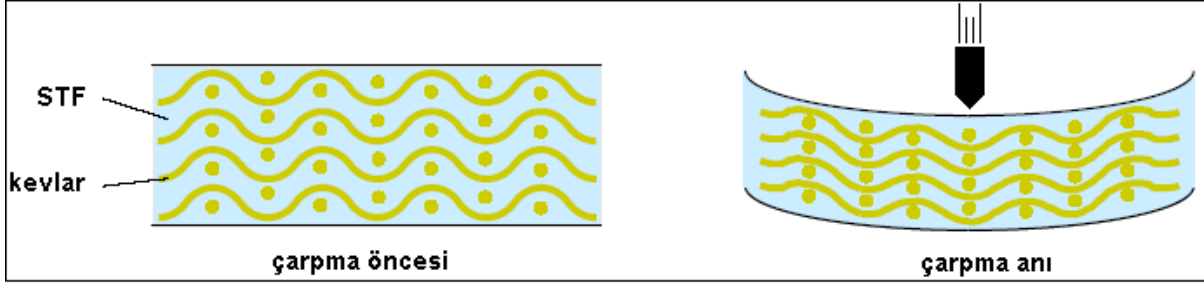
Bir maddenin kendisi için çözücü olmayan bir ortamda  $10^{-5}$  -  $10^{-7}$  cm boyutlarında dağılmasıyla oluşan çözeltilere kolloidal çözelti denir (<http://tr.wikipedia.org/wiki/Kolloid>). Daha basit bir ifadeyle mikron boyuttaki taneciklerden oluşan heterojen çözeltilere kolloidal çözelti adı verilmektedir. Bu tür çözeltiler gözle veya normal mikroskopla bakıldığı zaman homojen bir çözelti olarak görülmesine rağmen, ultra mikroskopla bakıldığı zaman heterojen olarak görülürler. Kolloidal silika dispersiyonu denildiğinde ise mikro veya nano boyutta silikon dioksitten parçacıklarından oluşmuş heterojen çözeltiler anlaşılmaktadır. Bunlarda çözücü ortam olarak su veya etilen glikol kullanılmaktadır. Nano parçacıklı kolloidal silika dispersiyonu visko-elastik malzeme özelliği göstermektedir. Bu dispersiyonlar newtonyen olmayan akış karakteri gösterip belli bir kuvvet değerinden sonra viskozitelerinde ani bir artış yaşanmaktadır. Bu geri dönüşebilir ani viskozite artışı parçalar arasındaki hidrodinamik yağ kuvvetleri nedeniyle, sıkışan kümelerin oluşmasından kaynaklanmaktadır (Wagner ve diğ., 2003). Bir başka ifadeyle, kümecikler arasındaki kısa aralıklı yağ kuvvetleri kümecikleri daha geniş hale getirdiği için kesme kuvvetine bağlı olarak viskozitelerinde artış meydana gelmektedir. Çünkü tabakalar içindeki kümeciklerin birbirleri üzerinden kaymaları zorlaşmaktadır. Kesme kalınlaşması başlamadan önce, düzenli bir halde bulunmayan parçacıklar tabakalar içinde serbestçe hareket etmektedirler. Tabakaların kalınlığı bir veya birkaç kat parçacığın çapı arasında değişmektedir. Kesme kalınlaşmasının başlamasıyla birlikte, hidrodinamik kararsızlık, parçacıkları bu katmanların dışına zorlamaktadır. Bununla birlikte parçacıklar kümeleşmeye ve/veya fiziksel temas yoluyla birbirlerini etkilemeye başlamaktadırlar. Parçacık etkileşiminin veya iticiliğinin olmadığı sınır durumda kesme kalınlaşması olabilmese de, genellikle kolloidal stabilite kesme kalınlaşması olabilmesi için gereklidir. Konsantr edilmiş kolloidal dispersiyonlardaki kesme kalınlaşmasını başlatmasını kontrol edecek boyutsuz gruplar, hidrodinamik kuvvetlerle parçacıklar arasındaki itme kuvvetleri arasında bir denge sağlamaktadırlar (Hoffman, 1997).



Şekil 5:

Silika dispersiyonlarda gerçekleşen kesme kalınlaşması  
([http://www.ccm.udel.edu/STF/PubLinks2/AdvancedBodyArmor\\_Pres.pdf](http://www.ccm.udel.edu/STF/PubLinks2/AdvancedBodyArmor_Pres.pdf))

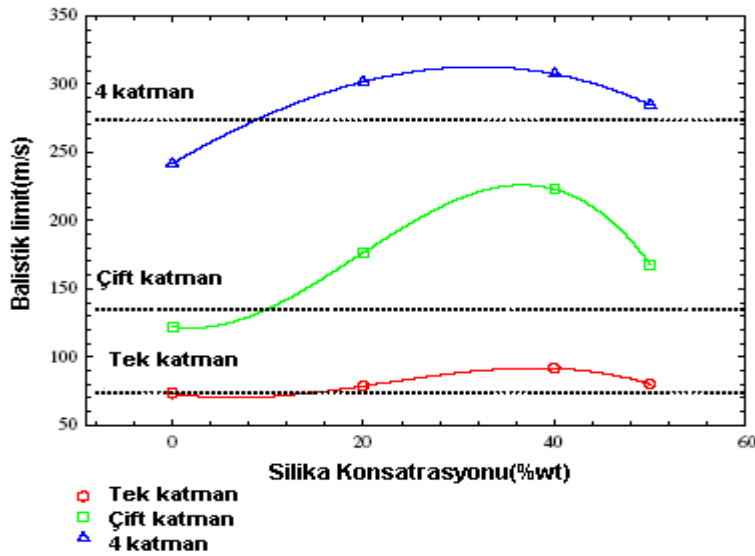
Yukarıdaki şekilde gözüktüğü üzere kesme oranı artışıyla birlikte akışkanın viskozitesinde düşüş meydana gelmektedir. Fakat belli bir kesme oranı değerinden sonra viskozitede ani bir artış meydana gelmekte yani kesme kalınlaşması başlamaktadır. Akışkanın bu özelliği koloidal silika dispersiyonlarının balistik tekstillerde kullanımını akla getirmektedir. Çünkü günümüzde balistik giysilerin konforu büyük önem taşımaktadır. Kullanıcının günlük normal hareketlerinde düşük kesme oranı olacağı için akışkan elastik malzeme gibi davranacak ve kullanıcın hareketini sınırlandırmayacaktır. Öte yandan, balistik bir olay esnasında ise kesme kalınlaşması meydana geleceği için silika dispersiyonu viskoz bir malzeme haline gelecek ve enerji absorbsiyonuna olumlu yönde katkı sağlayacaktır. Dolayısıyla, silika dispersiyonunun uygulamasıyla daha esnek, daha düşük ağırlıklı ve daha ince kurşungeçirmez yeleklerin üretimi gerçekleştirilebilecektir.



Şekil 6:

*Kolloidal dispersiyon emdirilmiş kevlar kumaşın darbe anındaki davranışı*  
([http://www.ccm.udel.edu/STF/PubLinks2/ProtectiveFabricsUtilizingSTF\\_Pres.pdf](http://www.ccm.udel.edu/STF/PubLinks2/ProtectiveFabricsUtilizingSTF_Pres.pdf))

Tan ve arkadaşları tarafından farklı konsantrasyondaki su bazlı silika dispersiyonunun Twaron® CT615 bezayağı dokuma kumaşın balistik performansına olan etkisi incelenmiştir. %20, 40 ve 50 konsantrasyondaki silika dispersiyonu tek, çift, dört ve altı katmanlı kumaş yapılarında incelenmiştir. Çift katmanlı yapıda en yüksek balistik direnç göstermekle birlikte, %40 konsantrasyon oranının tek katmanlı, çift katmanlı ve 4 katmanlı yapılarda en iyi balistik performansa sahip orantı olduğu görülmüştür. %40 konsantrasyondaki silika dispersiyonuyla emdirilmiş çift katmanlı yapı işlem görmemiş kumaşa göre %70 oranında daha iyi bir balistik performansa sahip olmaktadır. Balistik performanstaki bu artış mermi-kumaş sürtünmesindeki ve iplik içi sürtünmedeki artıştan kaynaklandığı savunulmuştur (Tan ve diğ., 2005).



Şekil 7:

*Farklı silika konsantrasyonunun balistik limite olan etkisi (Tan ve diğ., 2005)*



### 3. DENEYSEL ÇALIŞMA

#### 3.1. Materyal

##### 3.1.1. Tela Malzemesi

Bu çalışmada 18 gr/m<sup>2</sup>, 28 gr/m<sup>2</sup> ve 45 gr/m<sup>2</sup> olmak üzere farklı gramajlardaki polietilen dokusuz yüzey polietilen tela malzemesi kullanılmıştır.

##### 3.1.2. Kolloidal silika dispersiyonu

Ticari olarak AntisimaK, Antisima N ve Flexofix FL olarak bilinen ve atkı ve çözgü ipliklerinin kaymalarını önlemek için apre malzemesi olarak kullanılan, silikon dioksit mikro parçacıklarından oluşan kolloidal silika dispersiyonları kullanılmıştır.

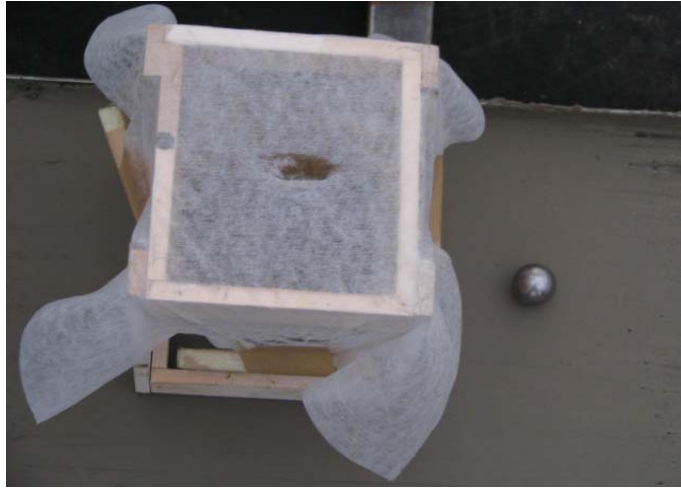
#### 3.2. Yöntem

##### 3.2.1. Numune Üretimi

Öncelikle 20, 30, 40 ve 50 g/l konsantrasyonlarında silika dispersiyonları hazırlanmıştır. Ardından 4 mt/dk hız ile 3 bar basınç altında pad-batch yöntemiyle %70 alınan flotte oranıyla, malzeme 30cm\*30cm boyutlarında kesilen telalara aktarılmış ve ardından 125 °C'de 3 dk süreyle kuru havayla fikse işlemi gerçekleştirilmiştir.

##### 3.2.2. Deneyin Yapılışı

Silika dispersiyonunun tela malzemesinin enerji absorpsiyonuna olan etkisini ölçmek amacıyla enerjinin korunumu prensibinden faydalanılmıştır. Bu amaçla 30cm\*30cm boyutlarında kolloidal silika dispersiyonu aplike edilmiş olan tela malzemeleri 13cm\*13cm boyutlarındaki kare bir çerçeve üzerine tam ortalanacak şekilde her bir kenarına 300 gr'lık ağırlıklar takılarak gerili bir halde yerleştirilmiştir. Kare çerçevenin arkasına ise yapılan enerji absorpsiyonunu belirlemek amacıyla şahit numune (kil tabakası) yerleştirilmiştir.



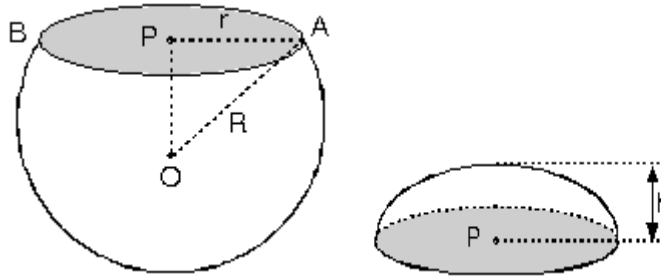
Şekil 8:  
Deney düzeneği

Ardından belirli bir yükseklikten küresel bir bilye ile tela malzemesinin tam orta noktasına isabet edecek şekilde her bir konsantrasyon ve gramaj için dört adet olmak üzere serbest atış yapılmıştır (Burada kullanılan bilye 23.6 mm çapa ve 55.1 gr ağırlığa sahiptir). Telayı delip geçen küresel bilye arka kısımda bulunan şahit numune üzerinde şekil-9'da görüldüğü biçimde çukur bir alan oluşturmuştur.



Şekil 9:  
Bilyenin şahit numune üzerinde oluşturduğu çukur

Şahit numune üzerinde oluşan bu çukurun çapı kumpasla ölçülmüş ve 4 numaralı bağıntı yardımıyla çukurun derinliği hesaplanmıştır. Şahit numune üzerinde bilyenin oluşturduğu çukurun çapının veya derinliğinin ne kadar düşük çıkması yapılan enerji absorpsiyonunun o oranda arttığının bir göstergesi olarak ele alınacaktır. Yukarıdaki şekilde gözüktüğü üzere serbest atış yaptırılan bilye, şahit numune üzerinde kesik küre şeklinde bir çukur alan oluşturmaktadır.



Şekil 10:  
Bilyenin kil tanığı üzerindeki simülasyonu (<http://www.matematikci.org/oss/geometri/17.htm>)

Bu kesik küre simülasyonunda h; bilyenin şahit numuneye batan kısmını yani derinliği, r; bilyenin şahit numuneye batan kısmının yarıçapını, R ise bilyenin yarıçapını ifade etmektedir. r değeri kumpasla ölçüldüğü için h değeri ise pisagor bağıntısından faydalanılarak aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanabilmektedir.

$$h = R - [(R-r) * (R+r)]^{0.5} \quad (4)$$

Yapılan ölçümlerin hiçbirinde bilyenin çapına eşit bir çap değeri elde edilmediği için 4 numaralı bağıntı geçerliliğini korumuştur. Oluşan bu kesik kürenin alanı ve hacmi aşağıdaki formüller yardımıyla hesaplanabilmektedir.

$$\text{KüreKapağınınAlanı} = 2\pi R h \quad (5)$$

$$\text{KüreParçasınınHacmi} = 2\pi R^2 h / 3 \quad (6)$$

Yüksekliğin enerji absorpsiyonuna olan etkisini inceleyebilmek amacıyla Antisima K ve Antisima N aplikasyonu yapılmış numunelere 96 cm yükseklikten, Flexofix FL aplikasyonu yapılmış numunelere ise 60 cm yükseklikten serbest atış gerçekleştirilmiştir. Kalibrasyon amacıyla, atışlar yapılmadan önce aynı yükseklikten tela malzemesi olmaksızın şahit numune üzerine bilye ile atış yapılmış ve oluşan çukur alanın hacmi hesaplanarak birim hacim başına düşen enerji miktarı hesaplanmıştır. Buna göre; 96 cm yükseklikten bilye tela malzemesi olmaksızın macun blok üzerine atıldığında macun blok üzerinde 9.75mm (r) yarıçapında ve 5.15 mm (h) yüksekliğinde küresel bir alan oluşturmuştur. 6 numaralı formül kullanılarak olu-

şan bu çukurun hacmi  $1501 \cdot 10^{-9} \text{m}^3$  olarak hesaplanmıştır. 96 cm yüksekliğindeki bilye mgh formülünden göre  $52896 \cdot 10^{-6} \text{J}$  lük bir potansiyel enerjiye sahiptir. Dolayısıyla 96 cm yüksekliğinden macun blok üzerinde  $1 \text{m}^3$  lük bir hacim oluşturabilmek için gerekli olan enerji miktarı  $52896 \cdot 10^{-6} / 1501 \cdot 10^{-9} = 35240 \text{J/m}^3$  olarak bulunmuştur. 60 cm yüksekliğinden yapılan atışta ise macun blokta 9.15mm (r) yarıçapında ve 4.35 mm (h) yüksekliğinde küresel bir alan oluşmuştur. Bu yükseklikten macun blok üzerinde  $1 \text{m}^3$  lük bir hacim oluşturabilmek için gerekli olan enerji miktarı  $33060 \cdot 10^{-6} / 1268 \cdot 10^{-9} = 26072 \text{J/m}^3$  olarak bulunmuştur. Atış yüksekliğinin artmasıyla birlikte bilyenin macun blok içine saplanan kısmı arttığı için sürtünme yüzeyi artmış ve dolayısıyla  $1 \text{m}^3$  lük bir hacim oluşturabilmek için gerekli olan enerji miktarı daha yüksek olmuştur.

Birim hacim başına düşen bu enerji miktarlarının doğrusal değiştiği ve hava sürtünmesinin ihmal edilebilecek kadar küçük olduğu kabulleri yapılarak, her bir atışta telayı delip geçen küresel bilyenin şahit numuneye temas ettiği andaki kalan enerji değeri hesaplanmıştır. Bilyenin başlangıçtaki potansiyel enerjisinden bu kalan enerji miktarı çıkarıldığında, tela malzemesinin absorbladığı enerji miktarı bulunmuştur.

### 3.2.3. Deneysel Bulguların İstatistiksel Analizi

Silika dispersiyonun enerji absorpsiyonuna olan etkisini inceleyebilmek ve sonuçları nesnel bir biçimde yorumlayabilmek için ölçümlerden elde edilen deneysel verinin istatistiksel analizi zorunludur. Burada analiz maksadıyla tek değişkenli ANOVA (Analysis of Variance) tekniği kullanılmıştır. Her bir kimyasal için silika dispersiyonunun konsantrasyonu ve tela malzemesinin gramajı değişken olarak ele alınmış ve dolayısıyla iki faktörlü varyans analizi yapılarak deneylerin istatistiksel analizi gerçekleştirilmiştir. Matematiksel model aşağıdaki şekilde oluşturulmuştur;

$$Y_{ijk} = \mu + T_i + M_j + TM_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (7)$$

Modelde,

- Y: Deneysel gözlemlenen veri (Bağımlı Değişken)
- $\mu$ : Deneyden gözlemlenen verilerden yola çıkarak tahmin edilen yığın ortalaması
- $T_i$ : Konsantrasyonun i.inci seviyesindeki etkisi
- $M_j$ : Tela gramajının j.inci seviyesindeki etkisi
- $TM_{ij}$ : Konsantrasyonun i.inci seviyesi ile tela gramajının j.inci seviyesinin etkileşimli etkisi
- $\varepsilon$ : Kuramsal olarak açıklanamayan hata

Yapılan bu modele göre şu hipotezler ortaya atılmıştır:

$H_{01}$ :  $T_i = 0$  (Orijinal hipotez kabul; konsantrasyonun etkisi yoktur)

$H_{A1}$ :  $T_i \neq 0$  (Orijinal hipotez ret; konsantrasyonun etkisi vardır)

$H_{02}$ :  $M_j = 0$  (Orijinal hipotez kabul; tela gramajının etkisi yoktur)

$H_{A2}$ :  $M_j \neq 0$  (Orijinal hipotez ret; tela gramajının etkisi vardır)

$H_{03}$ :  $TM_{ii} = 0$  (Orijinal hipotez kabul; konsantrasyon ile gramajın kesişiminin etkisi vardır)

$H_{A3}$ :  $TM_{ii} \neq 0$  (Orijinal hipotez ret; konsantrasyon ile gramajın kesişiminin etkisi yoktur)

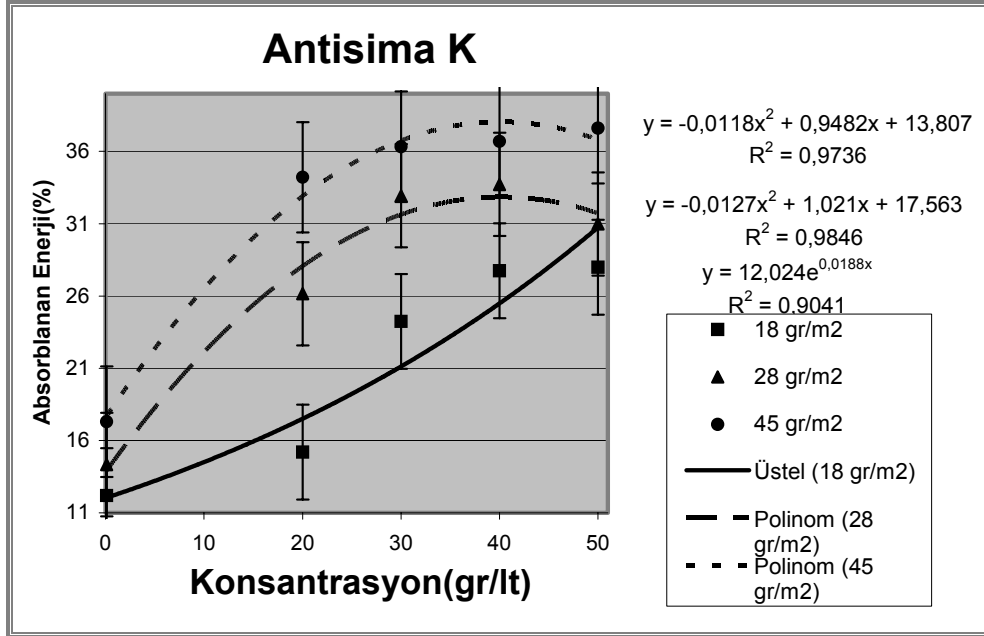
## 4. DENEY SONUÇLARI

Antisima K için yapılan analizlere göre hem tela gramajının, konsantrasyonun ve bu ikisinin etkileşiminin absorblanan enerji miktarı üzerinde etkisi olduğu görülmüştür. Yani başlangıçta kurulan 3 hipotez de reddedilmiştir. % 5 anlamlılık seviyesinde SNK testi sonuçlarına göre, aplikasyon yapılmamış ham telanın enerji absorblayabilme kabiliyeti diğer bütün konsantrasyonlardan farklıdır. Öte yandan, 50, 40 ve 30 gr/l konsantrasyonlardaki tela malzemelerinin absorbladığı enerji miktarları arasında fark yoktur. Her bir gramajdaki tela malzemelerinin absorbladığı enerji miktarları farklı olup; tela gramajının artmasıyla birlikte absorblanan enerji miktarında doğrusal bir artış gerçekleşmiştir.

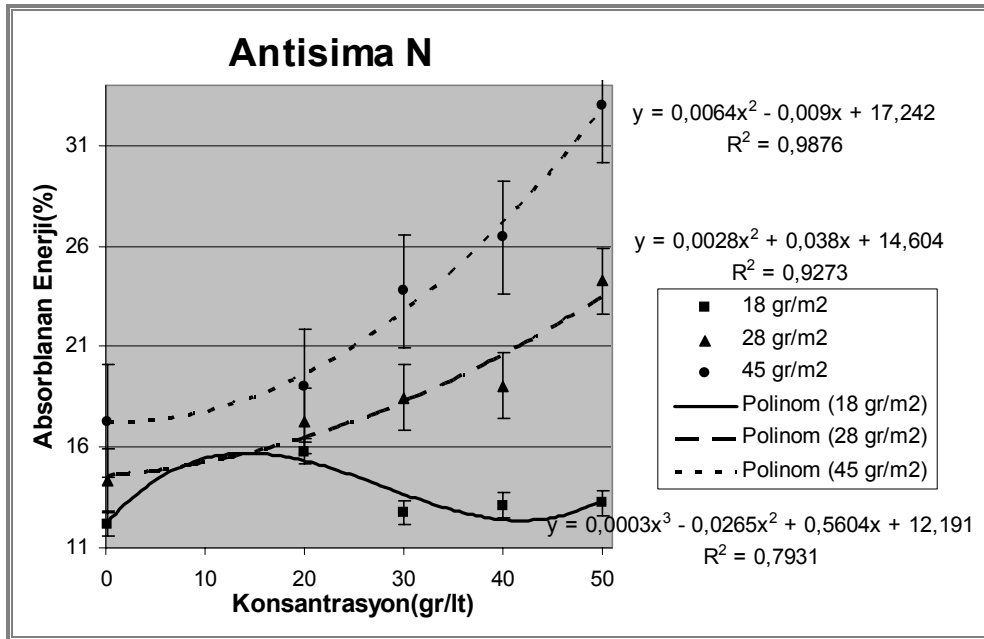
Benzer sonuçlar Antisima N için yapılan analizlerde de elde edilmiştir. Yani tela gramajının, konsantrasyonun ve bu ikisinin etkileşiminin enerji absorpsiyonuna etki ettiği görülmüştür. 20, 30 ve 40 gr/l konsantrasyonlarda yapılan enerji absorpsiyonlarının aynı olduğu görülmektedir. Diğer taraftan her bir tela gramajı için farklı seviyede enerji yutumu gerçekleşmiştir.

Flexofix FL için yapılan analiz sonuçlarına göre ise gramajın ve konsantrasyonun enerji absorpsiyonuna etkisi olduğu; bu ikisinin etkileşiminin ise yapılan absorpsiyonda bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Burada 30 ve 40gr/l konsantrasyonlarda yapılan enerji absorpsiyonu aynı olmakla birlikte bunun dışındaki diğer konsantrasyonlarda yapılan enerji absorpsiyonunun farklı olduğu görülmüştür.

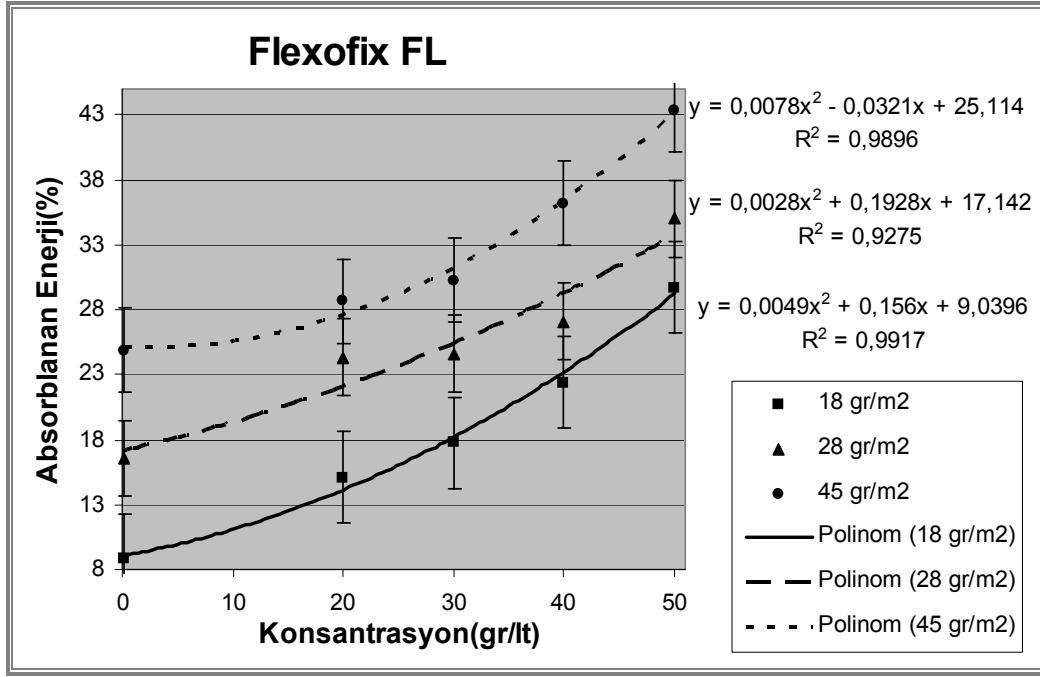
Aşağıdaki şekillerde her bir malzeme için konsantrasyona bağlı olarak gerçekleştirilen enerji absorpsiyonunun regresyon eğrileri verilmiştir.



Şekil 11:  
Antisima K için regresyon eğrisi



Şekil 12:  
Antisima N için regresyon eğrisi



Şekil 13:  
Flexofix FL için regresyon eğrisi

## 5. SONUÇLAR

Nano parçacıklı kolloidal silika dispersiyonun Kevlar® ve Twaron® dokuma kumaşların balistik performansına olan etkisi inceleyen birçok araştırma yapılmışken (Tan ve ark.,2005; Wagner ve ark.,2003) silika dispersiyonunun dokusuz yüzey malzemelerde olan etkisini incelen çok fazla çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmada mikro parçacıklı kolloidal silika dispersiyonunun polietilen dokusuz yüzey tela malzemesinin enerji absorpsiyonunda meydana getirdiği değişim ele alınmıştır. Bu amaçla tekstil sektöründe açmazlık apre malzemesi olarak kullanılan silika dispersiyonu farklı gramajlardaki polietilen dokusuz yüzey tela malzemesine aplikasyon edilerek yapılan enerji absorpsiyonu incelenmiş ve konsantrasyona ve tela gramajına bağlı olarak telanın absorbladığı enerji miktarının arttığı görülmüştür. Bu artışta silika dispersiyonunun kürecik ve tela arasındaki ve tela içi lif-lif sürtünmesini artırması etkili olmuştur. 28 ve 45 gr/m<sup>2</sup>'lik numunelerde aplikasyon yapılmamış ham telaya göre 50gr/l konsantrasyonda enerji absorpsiyonu hemen hemen iki katına çıkmıştır. Konsantrasyona bağlı olarak enerji absorpsiyondaki artış yüksek gramajlı numunelerde daha net bir şekilde gözükmemektedir. Bunun nedeni yüksek gramajlı numunelerin düşük gramajlı numunelere göre daha homojen bir lif dağılımı göstermesidir.

## 6. KAYNAKLAR

1. Cheeseman, B. A., Bogetti, T. A. (2003) Ballistic Impact into Fabric and Compliant Composite Laminates, *Composite Structure*, 61, 161-173.
2. Duan, Y., Kefe, M., Bogetti, T. A., Cheeseman, B. A., Powers, B. (2006) A Numerical Investigation of the influence of friction on energy by a high-strength fabric subjected to ballistic impact, *Impact Engineering*, 32, 1299-1312.
3. Hoffman R. L. (1997) Explanations for the cause of shear thickening in concentrated colloidal suspensions, The Society of Rheology.
4. Jacobs, M. J. N., Van Dingenen, J. L. J. Ballistic Protection Mechanism in personal armour, DSM High Performance Fibers, Eisterweg 3, 6422 PN Heerlen, The Netherlands.
5. Muszynski, S. (2004) Body Armor, Eastern Michigan University.
6. Tan, V. B. C., Tay, T. E., Teo, W. K. (2005). Strengthening fabric armour with silica colloidal suspensions, *International Journal of Solid and Structures*, 1561-1576.

7. Temiz, S. (2005) *Balistik Kumaş ve Test Yöntemleri Üzerine Bir Araştırma*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü.
8. Wagner, N. J., Wetzel E. D., Lee Y. S. (2003) The Ballistic Impact Characteristic of Kevlar Woven Fabrics Impregnated with a Collaidal Sehar Thickening Fluid, *Journal of Materials Science*, 285-283.
9. [http://www.ccm.udel.edu/STF/PubLinks2/AdvancedBodyArmor\\_Pres.pdf](http://www.ccm.udel.edu/STF/PubLinks2/AdvancedBodyArmor_Pres.pdf)
10. [http://www.ccm.udel.edu/STF/PubLinks2/ProtectiveFabricsUtilizingSTF\\_Pres.pdf](http://www.ccm.udel.edu/STF/PubLinks2/ProtectiveFabricsUtilizingSTF_Pres.pdf)
11. [http://www.leonuniform.com/BodyArmor\\_History.htm](http://www.leonuniform.com/BodyArmor_History.htm)
12. <http://www.matematikci.org/oss/geometri/17.htm>
13. [http://tubitaktam.ege.edu.tr/dosyalar/balistik\\_lifler.pdf](http://tubitaktam.ege.edu.tr/dosyalar/balistik_lifler.pdf)
14. <http://tr.wikipedia.org/wiki/Kolloid>

Makale 16.07.2007 tarihinde alınmış, 23.08.2007 tarihinde düzeltilmiş, 23.08.2007 tarihinde kabul edilmiştir. İletişim Yazarı: Y. Ulcay (ulcay@uludag.edu.tr).