



Kesme gerilimi altında kalınlaşan sıvı emdirilmiş S2 cam fiber kumaşların düşük hız delinme dirençlerinin araştırılması

Investigation of the low velocity puncture resistance of shear thickening fluid impregnated S2 glass fiber fabrics

Hamza TAŞI^{1*}, İbrahim Fadıl SOYKÖK², Abdul Jamil HALİMİ³

¹Makine Mühendisliği Bölümü, Hasan Ferdi Turgutlu Teknoloji Fakültesi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Manisa, Türkiye.

hamza.tas36@gmail.com

²Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Hasan Ferdi Turgutlu Teknoloji Fakültesi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Manisa, Türkiye.

ibrahim.soykok@cbu.edu.tr

³Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Manisa, Türkiye.

jamil_h.w@hotmail.com

Geliş Tarihi/Received: 15.03.2021

Düzeltilme Tarihi/Revision: 31.10.2021

doi: 10.5505/pajes.2022.87036

Kabul Tarihi/Accepted: 28.02.2022

Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmada literatürdeki çalışmalardan farklı olarak, yüksek mukavemete ve darbe dayanımına sahip S2 cam fiber kumaşlara kesme gerilimi altında kalınlaşan sıvı (shear thickening fluid: STF) emdirilerek düşük hız delme ve yarı statik delme dirençleri belirlenmiştir. Bu amaçla ilk olarak, ağırlıkça %20 oranında silika içeren polietilen glikol 400 (PEG400: Moleküler ağırlığı 400 g/mol'dür.)/silika süspansiyonu hazırlanarak reolojik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ardından, kuru ve STF emdirilmiş kumaşlara delici ucun 200 mm, 300 mm ve 400 mm yükseklikten bırakıldığı durum için ağırlık düşürme delme ve yarı statik delme (delme hızı 6 mm/dk.) testleri uygulanmıştır. Kumaşlarda oluşan hasarlar ve altlık malzemede oluşan deformasyon izleri detaylıca ele alınmıştır. Yapılan reolojik testler sonucunda ağırlıkça %20 oranında silika içeren PEG400/silika süspansiyonunun kesme kalınlaşması davranışı sergilediği görülmüştür. Kumaşlara STF emdirilmesiyle birlikte delici ucun sırasıyla 200 mm, 300 mm ve 400 mm yükseklikten bırakıldığı durum için delici ucun altlık malzemeye batma derinliğinde sırasıyla %30,7, %17,7 ve 20,7'lik bir azalma görülmüştür. Ayrıca, ağırlık artışı açısından STF emdirilmesinin kumaş tabakası sayısını arttırmaya göre daha makul sonuçlar verdiği görülmüştür. Yarı statik delme testleri sonucunda ise kuru ve STF emdirilmiş kumaşlar yakın karakteristik özellik göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Kesme kalınlaşması gösteren sıvı, S2 cam fiber, Reoloji, Düşük hız delme.

Abstract

In this study, unlike the studies available in the literature, low velocity puncture resistance and quasi-static puncture resistance of S2 glass fiber fabrics with high strength and impact resistance impregnated with shear thickening fluid (STF) was determined. For this purpose, firstly, a polyethylene glycol 400 (PEG400: 400 g/mole of molecular weight) suspension with the silica loading of 20 wt% was fabricated and then, rheological measurements were carried out. Then, drop weight puncture tests for the drop height of 200 mm, 300 mm and 400 mm and quasi-static puncture tests (6 mm/min of puncture velocity) were applied to neat and STF impregnated fabrics. Damages in fabrics and deformation marks on backing material were discussed in detail. As a result of the rheological tests, it was observed that the PEG400/silica suspension exhibits shear thickening behavior. With the STF impregnation, a decrease of 30.7%, 17.7% and 20.7% was observed in the penetration depth of the penetrator into the backing material for the drop height of 200 mm, 300 mm and 400 mm, respectively. In addition, It has been seen that the impregnation of STF gives more reasonable results in terms of weight increase than increasing the number of fabric layers. As a result of quasi-static puncture tests, neat and STF impregnated fabrics showed close characteristics.

Keywords: Shear thickening fluid, S2 glass fiber, Rheology, Low velocity puncture.

1 Giriş

Esnek (giyilebilir) zırhlar çok sayıdaki yüksek performanslı kumaşın tabakalar halinde dizilmesiyle üretilmektedir. Ancak, genellikle 20-50 tabaka kumaştan üretilen esnek gövde zırhları ağırlaşmakta ve esnekliğini yitirmektedir. Son yıllarda, balistik kumaşlara İngilizce literatürde shear thickening fluid (STF) olarak adlandırılan kesme gerilimi altında kalınlaşan sıvı emdirilerek bu problemi çözmeyi ve yüksek performanslı kumaşlar elde etmeyi amaçlayan çalışmalar ivme kazanmıştır [1].

Kesme gerilimi altında kalınlaşan sıvı, Newton tipi özellik göstermeyen, kayma şekil değiştirme hızına bağlı olarak viskozitesi değişen akışkanlardandır. Bu tür sıvılarda kritik kayma şekil değiştirme hızından itibaren viskozitede ani bir

artış görülür. Silika, kalsiyum karbonat gibi katı partiküllerin, su, glikol, polietilen glikol, gibi sıvılar içerisinde oluşturdukları kolloidal çok yoğun süspansiyonlarda kesme kalınlaşması davranışına rastlamak mümkündür [2],[3].

Yüksek performanslı kumaşların STF emdirilerek delinmeye karşı gösterdikleri direncin artırılması, bilim dünyasının dikkatini çekmiş ve bu konuda çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Srivastava ve diğ. [4] tarafından yapılan çalışmada, kumaşlara STF emdirilmesinin, kesme kalınlaşması davranışı sebebiyle kumaşların enerji soğurumunda artışa, iplikler/fiberler arasındaki sürtünmenin artmasına ve fiberler/iplikler arasında daha iyi kenetlenmeye ve yük transferine neden olduğu belirtilmiştir. Zielinska ve diğ. [5], yapmış oldukları yarı statik delme testleri sonucunda, kumaşlara STF emdirilmesinin iplik/fiberler arasındaki sürtünmeyi arttırdığını, dolayısıyla iplik/fiberlerin hareketinin kısıtlanmasına yol açtığını ifade

*Yazışılan yazar/Corresponding author

etmişlerdir. Egres ve diğ. [6] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, ağırlık düşürme delme testleri sonucunda bıçak biçimli delicinin kullanıldığı durum için kuru Kevlar kumaşlara STF emdirilmesinin kumaşın (Kuru Kevlar kumaşlardan oluşan numeneler 15 tabakalı ve STF emdirilmiş Kevlar kumaşlardan oluşan numuneler ise 12 tabakalıdır ve bu numunelerin alansal yoğunlukları yaklaşık eşittir.) delinmeye karşı gösterdiği direnci çok az arttırdığı, buna karşılık sivri uçlu delicinin kullanıldığı durum için ise STF emdirilmesinin kumaşın delinmeye karşı gösterdiği dirençte önemli bir artışa sebebiyet verdiği görülmüştür. Çünkü bıçak biçimli delicinin kullanıldığı durumda iplikler kesilerek kopmaya uğramaktadır ve kumaşlara STF emdirilmesinin, ipliklerin kopma dayanımının artmasında önemli bir rolü bulunmamaktadır [7]. Moleküler ağırlığı 200 g/mol olan polietilen glikol ve farklı ortalama çaplarda (100, 200 ve 500 nm) silika partiküllerinden elde edilen karışım Lee ve diğ. [8]'nin bir çalışmasında kumaşlara emdirilerek mekanik özellik değişimleri incelenmiştir. Yapılan balistik testler sonucunda, kumaşlara STF emdirilmesinin balistik dayanımı arttırdığı görülmüştür. Ayrıca, STF elde etmek için kullanılan partiküllerin boyut, şekil, karışım oranı ve sertliği ile taşıyıcı sıvı gibi kesme kalınlaşması davranış özelliğini belirleyen değişkenlerin STF emdirilmiş kumaşların yüksek ve düşük hızlı tehditler karşısında delinmeye karşı gösterdikleri dirence etkisinin araştırıldığı çalışmalara da literatürde çokça rastlamak mümkündür [5],[8]-[16].

S2 cam fiber kumaş yüksek üretim oranları, yüksek mukavemet, darbe dayanımı ve rijitliğe sahip olması, yanıcı olmaması, yüksek nem ve kimyasal dirence sahip olması ve nispeten ucuz olması gibi özelliklerinden dolayı yüksek kaliteli spor ekipmanlarında, dişçilikte ve otomotiv ve havacılık sektörü gibi birçok sektörde kullanılan ideal bir üründür [17],[18]. Literatürdeki çalışmalar detaylı olarak incelendiğinde, STF'nin çoğunlukla aramid (Twaron, Kevlar, Technora) ve ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (Dyneema, Spectra) esaslı kumaşlara uygulandığı görülmektedir [3]. Bu çalışmada, aramid ve ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen esaslı kumaşlar dışında daha önce hiç denenmemiş (literatürde rastlanmamıştır) yüksek mukavemete ve darbe dayanımına sahip S2 cam fiber kumaşlara STF emdirilmesinin düşük hız delme ve yarı statik delme dirençlerine etkisi araştırılmıştır. S2 cam fiber kumaş her ne kadar koruma amaçlı kullanılan bir kumaş olmasa da kullanıldığı yerler dolayısıyla düşük hız ve yarı statik yüklemelere maruz kalabilmektedir. Çalışmanın özgünlüğü, bilinen bir yöntemin farklı bir alana uygulanması olarak özetlenebilir. Bu amaçla, ağırlıkça %20 oranında silika içeren PEG400/silika süspansiyonu S2 cam fiber kumaşlara emdirilmiştir. Ardından kuru ve STF emdirilmiş kumaşlara ağırlık düşürme delme ve yarı statik delme testleri uygulanmıştır.

2 Malzeme ve yöntem

2.1 Malzemeler

Kesme kalınlaşması gösteren sıvı, silika (Aerosil 200) ve polietilen glikol 400'ün (81172, Sigma-Aldrich) karıştırılması ile elde edilmiştir. Polietilen glikolün (PEG) ortalama moleküler ağırlığı 400 g/mol, yoğunluğu ise 1.125 g/cm³'tür. Üretici firma tarafından sunulan, silikanın teknik özellikleri ise Tablo 1'de sunulmuştur.

Çalışmada kullanılan S2 cam fiber kumaşın dokuma tipi 8-H saten dokuma olup, alansal yoğunluğu 190 g/m² dir. Tedarikçi

firma (Dost Kimya Endüstriyel Hammaddeler San. ve Tic. Ltd. Şti, Türkiye) tarafından sunulan verilere göre S2 cam fiber kumaşın atkı ve çözgü sıklığı 55-60×52-56 iplik/inç'tir. S2 cam fiber kumaş ipliklerinin oldukça ince olması ve kumaşın çok sık dokunmuş olması sebebiyle iplik çekip çıkarma (yarn pull-out) testleri gerçekleştirilememiştir. Fakat, yayınlanmış diğer çalışmalarımızda [19],[20] STF'nin iplikler arasındaki sürtünmeyi arttırdığı yapılan iplik çekip çıkarma testleri ile doğrulanmıştır.

Tablo 1. Silikanın (Aerosil 200) teknik özellikleri.

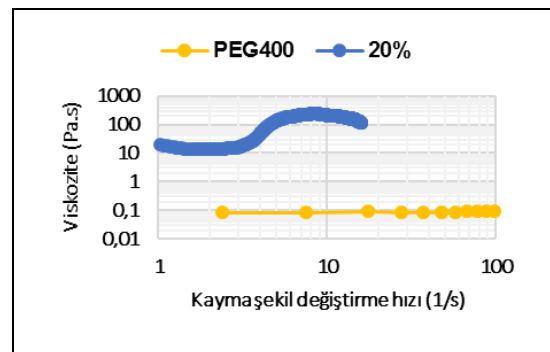
Table 1. Technical properties of silica (Aerosil 200).

Özellik	Değer
Özgül yüzey alanı (m ² /g)	175-225
%4 çözeltideki pH değeri (%)	3.7-4.5
Sıkıştırılmış yoğunluk (g/l)	Yaklaşık 50
Saflık (%)	>99.8

2.2 STF üretimi

İlk aşamada silika, belirli miktardaki PEG400 içerisine azar azar eklenerek mekanik bir karıştırıcıyla 1500 dev/dk. hızda 45 dk. boyunca karıştırılmıştır. Ardından, bu karışım 1 sa. boyunca ultrasonik banyoda bekletilerek homojenizasyon sağlanmış ve böylelikle STF üretimi tamamlanmıştır. Hazırlanan süspansiyon içerdiği hava kabarcıklarının giderilmesi amacıyla 24 sa. boyunca oda koşullarında bekletilmiş ve ardından reolojik ölçümler gerçekleştirilmiştir.

Şekil 1'de ağırlıkça %20 oranında silika içeren süspansiyona ve PEG400'e ait viskozite-kayma şekil değiştirme hızı eğrileri verilmiştir [19]. Eğriler incelendiğinde, PEG400'ün Newton tipi akışkan davranışı sergilediği, buna karşın ağırlıkça %20 oranında silika içeren süspansiyonun ise Newton tipi olmayan akışkan davranışı sergilediği görülmektedir. PEG400'ün viskozitesi 0.085 Pa.s olup kayma şekil değiştirme hızından etkilenmemektedir. PEG400'e ağırlıkça %20 oranında silika eklenmesiyle birlikte başlangıç viskozitesi artış göstererek 19.1 Pa.s değerine ulaşmıştır. Ağırlıkça %20 oranında silika içeren süspansiyon eğrisi temel olarak üç kısımdan oluşmaktadır. İlk aşamada kayma şekil değiştirme hızı arttıkça kritik kayma şekil değiştirme hızına ulaşana kadar (2.4 s⁻¹) düşük hızlarda viskozitede azalma gözlenmektedir. Kritik kayma şekil değiştirme hızından sonra viskozite ani bir artış göstermektedir ve süspansiyon viskozitesi maksimum değere (237.8 Pa.s) ulaştıktan sonra tekrar azalmaktadır. Silika konsantrasyonunun STF'nin reolojik davranışı üzerindeki rolü hakkında detaylı bir inceleme önceki çalışmamızda bulunabilir [19].



Şekil 1. Saf PEG400 ve ağırlıkça %20 oranında silika içeren süspansiyonun reolojik davranışı [19].

Figure 1. Rheological behaviour of pure PEG400 and suspension with the silica loading of 20 wt% [19].

Kesme kalınlaşması davranışı hidrodinamik kümelenme teorisi ile açıklanmaktadır. Bu teoriye göre, düşük kayma şekil değişimi hızlarında viskozitedeki azalma olayı partiküllerin aralarında oluşan karşılıklı kuvvetlerin etkisi altında akış doğrultusundaki dizilimlerinden kaynaklanmaktadır. Artan kayma şekil değişimi hızlarında ise partiküller arasında artış gösteren hidrodinamik kuvvetler kümelenmelerin (hidro-yığın) oluşumuna zemin hazırlamaktadır. Bu aşamadan itibaren viskozitede görülen ani artıştan, akış hareketini engellemeye çalışan sıvı içerisinde oluşum gösteren hidro-yığınlar sorumludur.

2.3 STF'nin kumaşlara emdirilmesi

Yüksek viskoziteye sahip olan STF'nin kumaşlara emilimini kolaylaştırmak amacıyla STF, hacimce 3/1 (etil alkol/STF) oranında etil alkol ile mekanik bir karıştırıcı kullanılarak 1500 dev/dk. hızda 30 dk. boyunca karıştırılmış ve ardından bu karışım homojenizasyonun sağlanabilmesi amacıyla ultrasonik banyoda 30 dk. boyunca bekletilmiştir. Daha sonra, bu karışım kullanılarak kumaşlar ıslatılmıştır. Kumaşlardaki fazlalık akışkanın giderilmesi için kumaşların üzerinden merdane ile geçilmiştir. Daha sonra, bu kumaşlar 65 °C'de 1 sa. süreyle etüv fırında bekletilerek üzerlerindeki etil alkol uzaklaştırılmıştır. Bu 1 sa.'lik süre boyunca kumaşlar çeşitli zaman aralıklarında fırından alınarak tartılmıştır. Kumaş ağırlığının bir süre sonra artık değişmemesi tüm etil alkolün kumaştan uzaklaştığı ve kumaşa sadece STF'nin kaldığı anlamını doğurmaktadır. Kumaşlar ıslatılmadan önce ve fırından alındıktan sonra tartılarak kumaşlar tarafından emilen STF miktarı belirlenmiştir (Tablo 2). Buna göre, kuru S2 cam fiber kumaşa STF emdirilmesiyle birlikte %20.0 oranında ağırlık artışı olmaktadır.

Tablo 2. Kuru ve STF emdirilmiş kumaşların ağırlıkları.

Table 2. Weights of neat and STF impregnated fabrics.

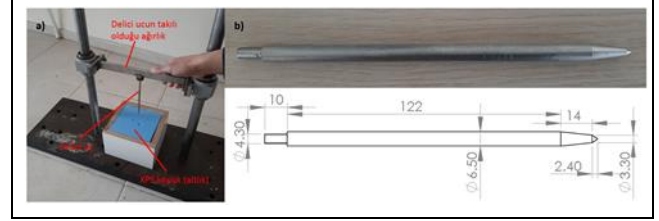
Tabaka sayısı	Kuru kumaş ağırlığı (g)	STF emdirilmiş kumaş ağırlığı (g)	Ağırlık artışı (%)
S2 cam kumaş	18.34 ± 0.21	22.01 ± 1.08	20.0

2.4 Ağırlık düşürme delme testlerinin yapılması

Kumaşların delinmeye karşı göstermiş oldukları direnç, NIJ standartları [21] esas alınarak ev yapımı bir ağırlık düşürme delme test cihazı Şekil 2(a) kullanılarak belirlenmiştir. Testlerde kullanılan delici uç ve ölçüleri Şekil 2(b)'de verilmiştir. Delici ucun takılı olduğu başlığın toplam ağırlığı (delici uç dahil) 2.6 kg'dır. 150 mm x 150 mm boyutlarında kesilerek hazırlanmış 4 tabaka kumaş, kalınlığı 60 mm olan 2 adet XPS köpük üzerine konularak delici ucun takılı olduğu başlık sırasıyla 200 mm, 300 mm ve 400 mm yüksekliklerden bırakılmıştır. Dijital bir kumpas kullanılarak delici ucun batma derinliği ve XPS köpük üzerinde oluşan deformasyon izi ölçülmüştür. Testler, deneysel hataları minimize etmek amacıyla üçer tekrar ile gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada gerçekleştirilen ağırlık düşürme testi ile NIJ 0115.00 standardında [21] verilen derinlik ölçüm yöntemi, delici uç geometrisi ve altlık malzeme farklılık göstermektedir. Gürgeç ve Kuşhan [22] tarafından da altlık malzeme olarak kullanılan XPS köpük, delici uç batma derinliğinin kolay ölçülmesi ve delici ucun net bir şekilde nüfuz etmesine olanak sağlayan kırılmalı yapısı nedeniyle tercih edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan derinlik ölçüm yöntemi, NIJ 0115.00 Standardında [21] önerilen tanık kağıt (witness paper)

yöntemine göre daha kesin sonuçlar vermektedir [22]. Ayrıca, NIJ 0115.00 standardında [21] önerilen delici ucun (engineered spike) yüksek darbe enerjilerinde deformasyon olması ihtimalinin yüksek olması nedeniyle bu çalışmada daha büyük yarıçaplı bir delici uç kullanılmıştır.



Şekil 2(a): Ev yapımı ağırlık düşürme delme test cihazı. (b): Delici uç (Ölçüler mm'dir), [19].

Figure 2. (a): Homemade drop tower test setup. (b): Impactor (Dimensions are in mm) [19].

2.5 Yarı statik delme testlerinin yapılması

Yarı statik delme testleri, 6 mm/dk. sabit delme hızıyla, 1 kN'luk yük hücrelerine sahip SHIMADZU AGS marka çekme-basma test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3). 150 mm x 150 mm boyutlarında kesilerek hazırlanmış 4 tabaka kumaş, kalınlığı 60 mm olan 2 adet XPS köpük üzerine konularak Şekil 2(b)'de verilen delici uç ile testler gerçekleştirilmiş ve delici ucun batma derinliği (deplasman) 30 mm olduğu anda test sonlandırılmıştır. Testler, deneysel hataları minimize etmek amacıyla üçer tekrar ile gerçekleştirilmiştir.



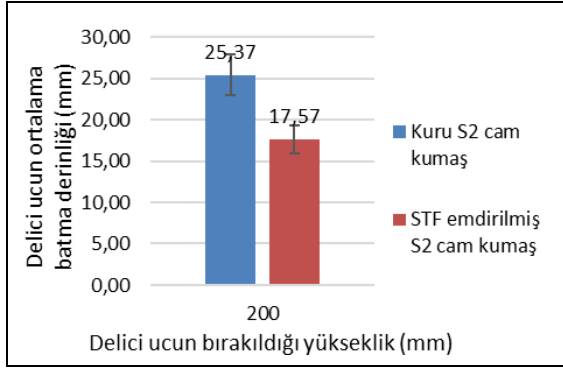
Şekil 3. Yarı statik delme test düzeneği.

Figure 3. Quasi-static puncture test setup.

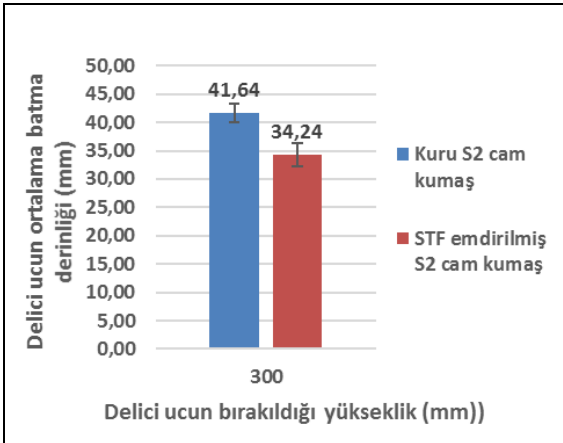
3 Bulgular ve tartışma

3.1 Kumaşların ağırlık düşürme delme direnci

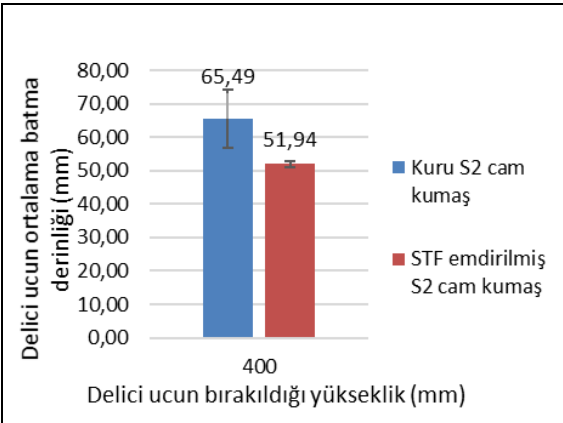
Kuru ve STF emdirilmiş S2 cam -fiber kumaşların delici ucun bırakıldığı farklı yükseklik değerleri için delinmeye karşı gösterdikleri direnç Şekil 4'te verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

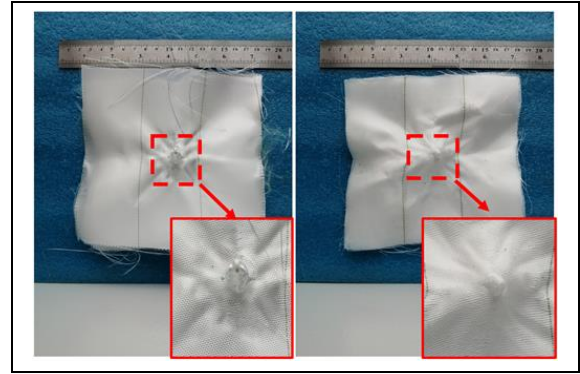
Şekil 4. Kuru ve STF emdirilmiş kumaşların ağırlık düşürme delme dirençleri. (a): Delici ucun 200 mm yükseklikten bırakıldığı durum. (b): Delici ucun 300 mm yükseklikten bırakıldığı durum. (c) Delici ucun 400 mm yükseklikten bırakıldığı durum.

Figure 4. Dynamic puncture resistance of neat and STF impregnated fabrics. (a): For the drop height of 200 mm. (b): For the drop height of 300 mm. (c): For the drop height of 400 mm.

Şekil 4'te görüleceği üzere delici ucun bırakıldığı her üç yükseklik değeri içinde STF emdirilmiş kumaşlar delinmeye karşı en yüksek direnci göstermiştir. Kumaşlara STF emdirilmesi delinmeye karşı göstermiş oldukları direncin artmasına neden olmuştur.

Delici ucun sırasıyla 200 mm, 300 mm ve 400 mm yükseklikten bırakıldığı durum için, kumaşlara STF emdirilmesiyle birlikte delici ucun batma derinliğinde %30.7, %17.7 ve %20.7'lik azalmalar görülmüştür. Bu durum, kumaşlara STF emdirilmesiyle birlikte delinme dirençlerinin arttığını göstermektedir. Decker ve diğ. [23] tarafından gerçekleştirilen çalışmada da, kevlar kumaşlara STF emdirilmiş ve yapılan ağırlık düşürme delme testleri sonucunda kumaşlara STF emdirilmesiyle birlikte delinmeye karşı göstermiş oldukları direncin arttığı görülmüştür. Ayrıca, Balali ve diğ. [24] tarafından yarı küresel uç kullanılarak kuru ve STF emdirilmiş cam fiber kumaşların düşük hız delinme dirençleri incelenmiş ve STF kullanımının cam fiber kumaşların düşük hız delinme direncini arttırdığı vurgulanmıştır.

Şekil 5'te delici ucun 300 mm yükseklikten bırakıldığı durum için kuru ve STF emdirilmiş kumaşlarda ağırlık düşürme delme testlerinden sonra meydana gelen hasarlar gösterilmiştir. Kuru kumaşlarda yırtılma olduğu ve delinmenin kumaşlardaki yırtılma sonucunda gerçekleştiği açıkça görülmektedir. STF emdirilmiş kumaşlarda ise ipliklerde oluşan bir miktar deformasyon ile birlikte delinme veya yırtılmanın hiç olmadığı görülmektedir.



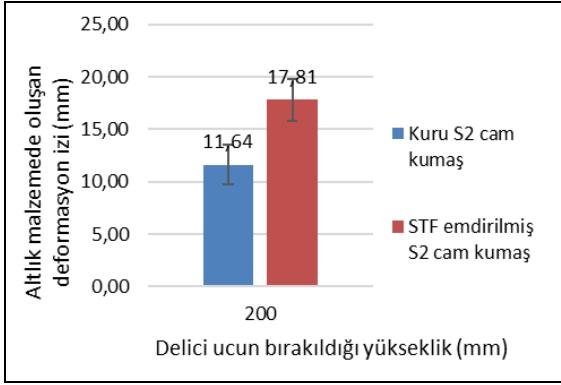
Şekil 5. Delici ucun 300 mm yükseklikten bırakıldığı durum için kuru (solda) ve STF emdirilmiş (sağda) kumaşlarda meydana gelen hasarlar.

Figure 5. Damages in the neat (left) and STF impregnated (right) fabrics for the drop height of 300 mm.

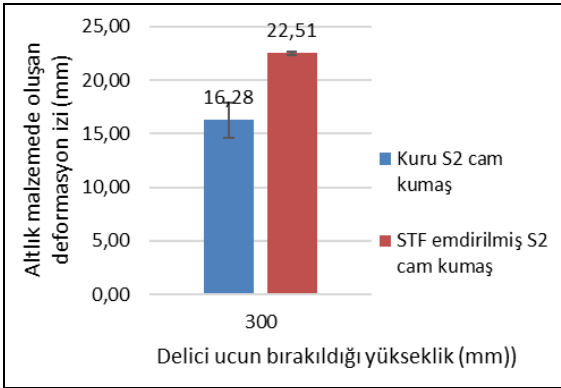
Gong ve diğ. [10] tarafından gerçekleştirilen çalışmada sivri uçlu delici karşısında kumaşlarda meydana gelen hasarın ipliklerin/fiberlerin birbiri üzerinde kayarak ilerlemesi ve/veya ipliklerin/fiberlerin delici uç tarafından kenara itilmesi (pencere açma) sonucunda meydana geldiği vurgulanmıştır. STF, iplikler/fiberler arasındaki sürtünmeyi arttırmaktadır ve bu etki STF uygulanmış kumaşların delinmeye karşı göstermiş oldukları direncin artmasındaki ana mekanizmadır [10],[12],[25]. Delici uç kumaşa çarptığı anda kesme kalınlığı etkisiyle iplikler/fiberler arasında artan sürtünme dolayısıyla kuru kumaşlara kıyasla daha iyi bir kenetlenme meydana gelmektedir. Bu da delici ucun kumaşı delip ilerlemesini engellemektedir.

Kuru ve STF emdirilmiş kumaşlar için altlık malzemede meydana gelen deformasyon iz genişlikleri delici ucun bırakıldığı farklı yükseklik değerleri için Şekil 6'da verilmiştir.

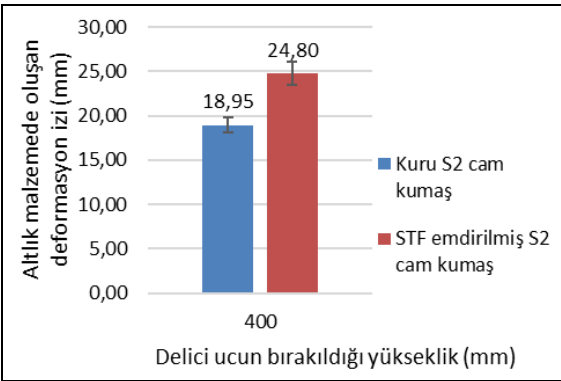
Delici ucun sırasıyla 200 mm, 300 mm ve 400 mm yükseklikten bırakıldığı durumda kuru kumaşlara STF emdirilmesiyle birlikte altlık malzemede oluşan deformasyon iz genişliğinde %53.0, %38.3 ve %30.8'lik artışlar görülmüştür.



(a)



(b)



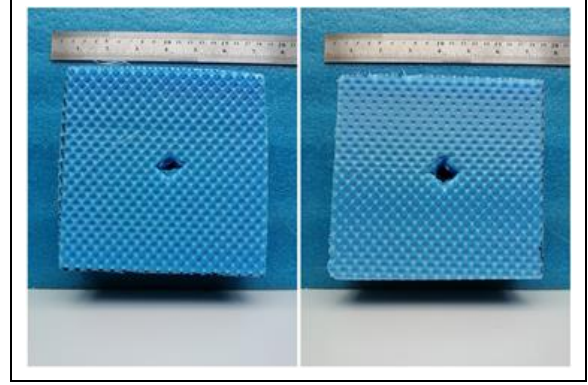
(c)

Şekil 6. Kuru ve STF emdirilmiş kumaşlar için altlık malzemede oluşan deformasyon izi. (a): Delici ucun 200 mm yükseklikten bırakıldığı durum. (b): Delici ucun 300 mm yükseklikten bırakıldığı durum. (c): Delici ucun 400 mm yükseklikten bırakıldığı durum.

Figure 6. Deformation mark on the backing materials. (a): For the drop height of 200 mm. (b): For the drop height of 300 mm. (c): For the drop height of 400 mm.

Şekil 7'de delici ucun 300 mm yükseklikten bırakıldığı durum için kuru ve STF emdirilmiş kumaşların üzerine yerleştirildiği altlık malzemede meydana gelen deformasyon izleri gösterilmiştir. Kuru kumaşlarda iplikler arasındaki düşük sürtünmeden dolayı darbe noktasına yakın komşu iplikler enerji emilimine katkıda bulunamamakta ve böylelikle darbe enerjisi lokal bir alanda toplanmaktadır. Bu durum altlık malzemede oluşan deformasyon iz genişliğinin düşük, deformasyon derinliğinin ise yüksek olmasına neden

olmaktadır. Kumaşlara STF emdirilmesiyle birlikte iplikler arası sürtünmenin artmasından dolayı darbe noktasına yakın komşu iplikler enerji emilimine katkıda bulunabilmektedir. Böylelikle, darbe enerjisi lokal bir alanda toplanmak yerine geniş bir alana yayılmaktadır. Bu durum, altlık malzemede oluşan deformasyon iz genişliğinin yüksek, deformasyon derinliğinin ise düşük olmasına sebep olmaktadır.



Şekil 7. Delici ucun 300 mm yüksekten bırakıldığı durum için kuru (solda) ve STF emdirilmiş (sağda) kumaşlar için altlık malzemede oluşan deformasyon izleri

Figure 7. Deformation mark on the backing materials for the neat (left) and STF impregnated (right) fabrics.

Tablo 3'te STF emdirilmiş (4 tabaka) ve kuru (5-6 tabaka) S2 cam fiber kumaşın delici ucun bırakıldığı farklı yükseklik değerleri için ağırlık düşürme delme dirençleri ve ağırlıkları verilmiştir.

Tablo 3. STF emdirilmiş (4 tabaka) ve kuru (5-6 tabaka) S2 cam fiber kumaşın ağırlık düşürme delme direnci ve ağırlığı.

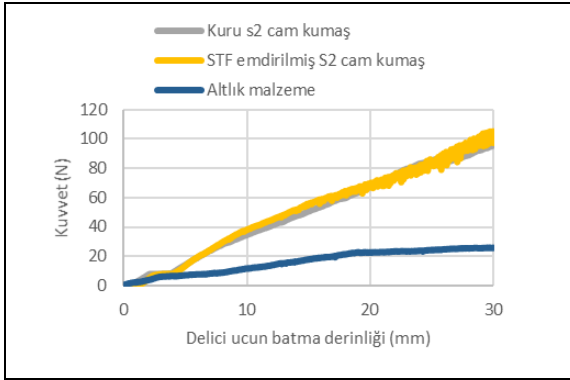
Table 3. Drop weight puncture resistance and weight of STF impregnated (4 fabric layers) and neat (5-6 fabric layers) S2 glass fiber fabrics.

	STF Emdirilmiş Kumaş Tabaka Sayısı		Kuru Kumaş Tabaka Sayısı		
	4		5-6		
	Delici ucun ortalama batma derinliği (mm)	Ağırlık (g)	Delici ucun ortalama batma derinliği (mm)	Ağırlık (g)	
Delici ucun bırakıldığı yükseklik (mm)	200	17.57±1.7	18.67±2.1	-	
		-	15.43±1.3	22.56±0.34	
	300	34.24±2.1	22.01±1.08	38.17±1.6	-
		-	-	32.12±3.2	27.03±0.72
	400	51.94±1.0	-	57.78±4.7	-
		-	-	49.97±3.9	-

Tablo 3 ve Şekil 4 incelendiğinde kuru kumaş tabaka sayısının arttıkça delinmeye karşı gösterilen direncin arttığı görülmektedir. Kumaş tabaka sayısının 5-6 olması durumunda delici ucun batma derinliğinin kumaşlara STF emdirildiği durumdaki delici ucun batma derinliğine yaklaşık eşit olduğu Tablo 3'te görülmektedir. Fakat STF emdirilmiş kumaşlarda (4 tabaka kumaş) kuru kumaşlara (4 tabaka kumaş) kıyasla ağırlık %20.0 oranında artarken, kuru kumaş tabaka sayısının 5-6 olması durumunda ortalama ağırlık artışı %35.2 olmuştur. Bu durum, STF kullanımının ağırlık artışı bakımından makul sonuçlar verdiğini göstermektedir.

3.2 Kumaşların yarı statik delinme direnci

Kuru ve STF emdirilmiş S2 cam fiber kumaşların ve altlık malzemesinin 6 mm/dk. sabit delme hızı altında delinmeye karşı gösterdikleri dirençler Şekil 8'de verilmiştir. Buna göre kuru S2 cam kumaş ve STF emdirilmiş S2 cam kumaş birbirine yakın karakteristikler sergilemektedir. Kuru kumaşlara STF emdirilmesiyle birlikte sabit hız altında kumaşları delmek için uygulanması gereken kuvvet %7.3'lük bir artış göstermiştir. Kang ve diğ. [26] tarafından kevlar kumaşlar üzerinde gerçekleştirilen bir çalışmada da kuru ve STF emdirilmiş kumaşlara yarı statik delme testleri uygulanmış ve kumaşlara STF emdirilmesinin kumaşların yarı statik delme direncini arttırdığı görülmüştür. Yu ve diğ. [27] tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise kuru ve STF emdirilmiş cam fiber kumaşların bıçak şeklindeki delici uç karşısındaki yarı statik delme dirençleri araştırılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda cam fiber kumaşlara STF emdirilmesinin kumaşların yarı-statik delme dirençlerini arttırdığı görülmüştür. Balali ve diğ. [24] tarafından gerçekleştirilen çalışmada da kumaşlara STF emdirilmesi ile birlikte yarı statik delme dirençlerinin artarken, bu çalışmada STF emdirilmiş kumaş ile kuru kumaşların yakın karakteristik sergilemesinin nedeni deney sınır şartlarının ve kullanılan delici uç geometrisinin farklı olmasıdır.



Şekil 8. Kuru ve STF emdirilmiş kumaşların yarı statik delinme direnci.

Figure 8. Quasi-static puncture resistance of neat and STF impregnated fabrics.

Yarı statik ve ağırlık düşürme delme testlerinde delici ucun kumaş delme hızına (kumaşa çarpma hızına) bağlı olarak STF'de oluşan kayma şekil değiştirme hızı Eş. 1 yardımıyla hesaplanmaktadır [16].

$$s = \frac{v}{d} \quad (1)$$

Burada s , kumaş delme hızına bağlı olarak STF'de oluşan kayma şekil değiştirme hızı (s^{-1}), v , kumaş delme hızı (mm/s) ve d , bıçak şeklindeki delicinin (engineered knife) kalınlığıdır (mm).

Bu çalışmada, yarı statik delme koşulları için delme hızı 6 mm/dk. olup bıçak şeklindeki delicinin kalınlığı (Delici uç olarak sivri uçlu delici kullanıldığından ortalama çap alınmıştır.) ise 3.3 mm olarak alınmıştır. Bu koşullar altında yarı statik delme testlerinde STF'de oluşan kayma şekil değiştirme hızı $0.03 s^{-1}$ 'dir. Bu değer, kritik kayma şekil değiştirme hızından ($2.4 s^{-1}$) oldukça düşüktür ve dolayısıyla yarı statik delme koşullarında kesme kalınlaşması davranışı etkisiyle kumaşın delinmeye karşı gösterdiği direncin artması beklenemez. Fakat yapılan testler, kumaşın delinmeye karşı gösterdiği direncin %7.3 oranında arttığını göstermiştir. Delinmeye karşı gösterilen dirençteki artış, STF'nin kesme kalınlaşması davranışından değil de, iplik hareketliliğini kısıtlayan STF'nin kumaş içindeki boşlukları doldurmasından kaynaklanmaktadır [28].

4 Sonuçlar

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar temel olarak aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- PEG400 Newton tipi akışkan davranışı sergilerken, ağırlıkça %20 oranında silika içeren PEG400/silika süspansiyonu Newton tipi olmayan ve kesme kalınlaşması gösteren bir akışkan davranışı göstermektedir,
- PEG400'ün viskozite değeri 0.085 Pa.s olup kayma şekil değiştirme hızına bağımlı değildir,
- Ağırlıkça %20 oranında silika içeren PEG400/silika süspansiyonunun kritik kayma şekil değiştirme hızı $2.4 s^{-1}$ ve ölçülen maksimum viskozitesi 237.8 Pa.s'dir,
- Delici ucun 200 mm yükseklikten bırakıldığı koşul için, kumaşlara STF emdirilmesiyle birlikte delici ucun batma derinliğinde delinme direnci artışından kaynaklı %30.7'lik bir azalma görülmüştür,
- Delici ucun 300 mm yükseklikten bırakıldığı koşul için, kumaşlara STF emdirilmesiyle delici ucun batma derinliğinde delinme direnci artışından kaynaklı %17.7'lik bir azalma görülmüştür,
- Delici ucun 400 mm yükseklikten bırakıldığı koşul için, kumaşlara STF emdirilmesiyle birlikte delici ucun batma derinliğinde delinme direnci artışından kaynaklı %20.7'lik bir azalma görülmüştür,
- STF emdirilmiş 4 tabaka kumaşın delinmeye karşı gösterdiği direnç, 5-6 tabaka kuru kumaşın delinmeye karşı göstermiş olduğu dirence yaklaşık eşittir. Buna karşın, STF emdirilmiş kumaşların ağırlığı %20.0 artarken, 5-6 tabaka kuru kumaş kullanılması durumunda ağırlık artışı %35.2 olmuştur,
- Kuru ve STF emdirilmiş S2 cam fiber kumaşlar sabit delme hızı altında (6 mm/dk.) birbirine yakın karakteristikler sergilemişlerdir.

5 Conclusions

The results obtained in this study are basically presented below as items.

- While PEG400 exhibits Newtonian fluid behavior, the PEG400/silica suspension with the silica loading of 20 w% exhibits non-Newtonian and shear thickening fluid behavior,
- Viscosity of PEG400 does not change with the change of shear rate and its value is 0.085 Pa.s,

- Critical shear rate and maximum viscosity of the PEG400/silica suspension with the silica loading of 20 w% are 2.4 s^{-1} and 237.8 Pa.s, respectively,
- For the drop height of 200 mm, due to the increase in puncture resistance a 30.7% decrease in the penetration depth of penetrator into the backing material was observed with STF impregnation of the fabrics,
- For the drop height of 300 mm, due to the increase in puncture resistance a 17.7% decrease in the penetration depth of penetrator into the backing material was observed with STF impregnation of the fabrics,
- For the drop height of 400 mm, due to the increase in puncture resistance a 20.7% decrease in the penetration depth of penetrator into the backing material was observed with STF impregnation of the fabrics.
- The puncture resistance of 4 layers of STF impregnated fabric is approximately equal to the puncture resistance of 5-6 layers of neat fabric. On the other hand, while the weight of STF impregnated fabrics increased by 20.0%, the weight increased by 35.2% when 5-6 layers of neat fabric were used,
- Neat and STF impregnated S2 glass fiber fabrics exhibited similar characteristics as a result of quasi-static puncture tests.

6 Teşekkür

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) (Proje No: 218M699) ve Manisa Celal Bayar Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (BAP) (Proje No: 2018-187) tarafından desteklenmiştir. Yazarlar destekleri için teşekkürlerini sunarlar.

7 Yazar katkı beyanı

Yazarlar çalışmaya eşit oranda katkı sağlamıştır. Hamza TAŞ fikrin oluşması, literatür taraması, malzemelerin temin edilmesi, testlerin yapılması ve makalenin yazılması başlıklarında; İbrahim Fadıl SOYKÖK malzemelerin temin edilmesi, elde edilen sonuçların değerlendirilmesi, yazım denetimi ve makalenin kontrol edilmesi başlıklarında; Abdul Jamil HALİMİ testlerin yapılması ve literatür taraması başlıklarında katkı sunmuşlardır.

8 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

9 Kaynaklar

- [1] Hasanzadeh M, Mottaghitalab V, Babaei H, Rezaei M. "The influence of carbon nanotubes on quasi-static puncture resistance and yarn pull-out behavior of shear-thickening fluids (STFs) impregnated woven fabrics". *Composites: Part A*, 88, 263-271, 2016.
- [2] Ge J, Tan Z, Li W, Zhang H. "The rheological properties of shear thickening fluid reinforced with SiC nanowires". *Results in Physics*, 7, 3369-3372, 2017.
- [3] Gürgeç S, Kuşhan MC, Li W. "Shear thickening fluids in protective applications: A review". *Progress in Polymer Science*, 75, 48-72, 2017(a).
- [4] Srivastava A, Majumdar A, Butola BS. "Improving the impact resistance of textile structures by using shear thickening fluids: A review". *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 37(2), 115-129, 2012.
- [5] Zielinska D, Delczyk-Olejniczak B, Wierzbicki L, Wilbik-Halgas B, Struszczyk MH, Leonowicz M. "Investigation of the effect of para-aramid fabric impregnation with shear thickening fluid on quasi-static stab resistance". *Textile Research Journal*, 84(15), 1569-1577, 2014.
- [6] Egres RG, Lee YS, Kirkwood JE, Kirkwood KM, Wetzel ED, Wagner NJ. "Liquid armor: Protective fabrics utilizing shear thickening fluids". *4th International Conference on Safety and Protective Fabrics*, Pittsburgh, USA, 26-27 October 2004.
- [7] Sun LL, Xiong DS, Xu CY. "Application of shear thickening fluid in ultra-high molecular weight polyethylene fabric". *Journal of Applied Polymer Science*, 129(4), 1922-1928, 2013.
- [8] Lee BW, Kim IJ, Kim CG. "The Influence of the particle size of silica on the ballistic performance of fabrics impregnated with silica colloidal suspension". *Journal of Composite Materials*, 43(23), 2679-2698, 2009.
- [9] Wetzel ED, Lee YS, Egres RG, Kirkwood KM, Kirkwood JE, Wagner NJ. "The effect of rheological parameters on the ballistic properties of shear thickening fluid (STF)-kevlar composites". *In AIP conference proceedings*, 712(1), 288-293, 2004.
- [10] Gong X, Xu Y, Zhu W, Xuan S, Jiang W, Jiang W. "Study of the knife stab and puncture-resistant performance for shear thickening fluid enhanced fabric". *Journal of Composite Materials*, 48(6), 641-657, 2013.
- [11] Feng X, Li S, Wang Y, Wang Y, Liu J. "Effects of different silica particles on quasi-static stab resistant properties of fabrics impregnated with shear thickening fluids". *Materials & Design*, 64, 456-461, 2014.
- [12] Baharvandi H R, Alebooyeh M, Alizadeh M, Heydari MS, Kordani N, Khaksari P. "The influences of particle-particle interaction and viscosity of carrier fluid on characteristics of silica and calcium carbonate suspensions-coated Twaron® composite". *Journal of Experimental Nanoscience*, 11(7), 550-563, 2015(a).
- [13] Baharvandi HR, Alebooyeh M, Alizadeh M, Khaksari P, Kordani N. "Effect of silica weight fraction on rheological and quasi-static puncture characteristics of shear thickening fluid-treated Twaron® composite". *Journal of Industrial Textiles*, 46(2), 473-494, 2015b.
- [14] Petel OE, Ouellet S, Loiseau J, Frost DL, Higgins AJ. "A comparison of the ballistic performance of shear thickening fluids based on particle strength and volume fraction". *International Journal of Impact Engineering*, 85, 83-96, 2015.
- [15] Li W, Xiong D, Zhao X, Sun L, Liu J. "Dynamic stab resistance of ultra-high molecular weight polyethylene fabric impregnated with shear thickening fluid". *Materials & Design*, 102, 162-167, 2016.
- [16] Xu Y, Chen X, Wang Y, Yuan Z. "Stabbing resistance of body armour panels impregnated with shear thickening fluid". *Composite Structures*, 163, 465-473, 2017.

- [17] Potluri R, Supriya K, Vittal GVVNG. "Effect of boron carbide particles inclusion on the mechanical behaviour of S2-Glass fiber based polyester composites". *Materials Today: Proceedings*, 5(9), 20257-20267, 2018.
- [18] Huang Q, Garoushi S, Lin Z, He J, Qin W, Liu F, Vallittu PK, Lassila LVJ. "Properties of discontinuous S2-glass fiber-particulate-reinforced resin composites with two different fiber length distributions". *Journal of Prosthodontic Research*, 61(4), 471-479, 2017.
- [19] Taş H, Soykök İF. "Investigation of the Low Velocity Impact Behaviour of Shear Thickening Fluid Impregnated Kevlar, Hybrid (Kevlar/Carbon) and Carbon Fabrics". *Fibers and Polymers*, 22, 2626-2634, 2021.
- [20] Taş H, Soykok İF. "Puncture resistance of STF impregnated MWCNTs-grafted carbon fabrics". *Materials Today Communications*, 28, 1-9, 2021.
- [21] Office of Law Enforcement Standards. "Stab Resistance of Personal Body Armor-NIJ Standard-0115.00". National Institute of Justice, Washington, USA, 0115.00, 2000.
- [22] Gürgeç S, Kuşhan MC. "The effect of silicon carbide additives on the stab resistance of shear thickening fluid treated fabrics". *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 24(16), 1381-1390, 2017.
- [23] Decker MJ, Halbach CJ, Nam CH, Wagner NJ, Wetzel ED. "Stab resistance of shear thickening fluid (STF)-treated fabrics". *Composites Science and Technology*, 67(3-4), 565-578, 2007.
- [24] Balali E, Kordani N, Sadough Vanini A. "Response of glass fiber-reinforced hybrid shear thickening fluid (STF) under low-velocity impact". *The Journal of The Textile Institute*, 108(3), 376-384, 2017.
- [25] Srivastava A, Majumdar A, Butola BS. "Improving the impact resistance performance of Kevlar fabrics using silica based shear thickening fluid". *Materials Science and Engineering: A*, 529, 224-229, 2011.
- [26] Kang TJ, Hong KH, Yoo MR. "Preparation and properties of fumed silica/Kevlar composite fabrics for application of stab resistant material". *Fibers and Polymers*, 11(5), 719-724, 2010.
- [27] Yu K, Cao H, Qian K, Jiang L, Li H. "Synthesis and stab resistance of shear thickening fluid (STF) impregnated glass fabric composites". *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 6A(95), 126-128, 2012.
- [28] Park JL, Yoon BI, Paik JG, Kang TJ. "Ballistic performance of p-aramid fabrics impregnated with shear thickening fluid; part I-effect of laminating sequence". *Textile Research Journal*, 82(6), 527-541, 2012.