

# Primjena nenevtonskih tekućina u izradi polimernih kompozita

---

Ivanković, Luka

Master's thesis / Diplomski rad

2024

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:255739>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-09**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Luka Ivanković

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Zdravko Schauperl, dipl. ing.

Student:

Luka Ivanković

Zagreb, 2024.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Zdravku Schauperlu na susretljivosti, pomoći i potpori tijekom izrade ovog rada. Veliku zahvalnost dugujem gospodinu Božidaru Bušetinčanu i gospodinu Ivanu Martinku za pomoć pri pripravi i testiranju mehaničkih svojstava uzoraka, te dr. sc. Daliboru Viderščaku za korisne savjete pri pisanju i oblikovanju rada .

Luka Ivanković



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:

Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment,  
mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija



Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 24 - 06 / 1	
Ur.broj: 15 - 24 -	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Luka Ivanković** JMBAG: 0035213811

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Primjena nenevtonskih tekućina u izradi polimernih kompozita**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Application of non-Newtonian fluids in the production of polymer composites**

Opis zadatka:

Nenevtonski fluid je fluid koji ima promjenjivu viskoznost ovisnu o vanjskom opterećenju. To svojstvo je vrlo interesantno u izradi materijala za zaštitu od kinetičkih penetratora i danas se intenzivno istražuje.

U teoretskom dijelu rada potrebno je objasniti mehanizme zaštite od kinetičkih penetratora te dati prikaz dostupnih istraživanja nenevtonskih tekućina na tom polju. U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je izraditi nenevtonske tekućine i s njima impregnirati ploče od polimernog kompozita. Iz izrađenih ploča potrebno je izrezati uzorke za laboratorijska ispitivanja osnovnih mehaničkih svojstava te provesti ta ispitivanja.

Na temelju dobivenih rezultata ispitivanja potrebno je donijeti zaključke o utjecaju nenevtonskih tekućina na mehanička svojstva izrađenih uzoraka te navesti potencijalne mogućnosti primjene takvih materijala.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak za dan:

7. ožujka 2024.

Zadatak zadao:

Prof.dr.sc. Zdravko Schauerl

Datum predaje rada:

9. svibnja 2024.

Predviđeni datumi obrane:

13. – 17. svibnja 2024.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

## SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA	III
POPIS OZNAKA	IV
SAŽETAK	V
SUMMARY	VI
1. UVOD	1
2. OPĆI DIO	2
2.1. Nenewtonske tekućine	2
2.1.1. Posmično zgušnjavajuće tekućine	3
2.1.1.1. Mehanizmi posmičnog zgušnjavanja	4
2.2. Priprava kompozitnih materijala za balističku zaštitu	8
2.3. Pregled dosadašnjih istraživanja kompozitnih materijala za balističku zaštitu	8
2.4. Mehanizmi zaštite od kinetičkih penetratora	13
3. EKSPERIMENTALNI DIO	16
3.1. Materijali	16
3.2. Impregniranje ojačala nenewtonskom tekućinom	16
3.3. Priprava kompozitnih materijala	17
3.4. Određivanje mehaničkih svojstava kompozitnih materijala	18
3.4.1. Statički vlačni pokus	18
3.4.2. Ispitivanje udarnog rada loma	19
4. REZULTATI	20
4.1. Rezultati statičkog vlačnog pokusa	20
4.2. Rezultati ispitivanja udarnog rada loma	29
5. ZAKLJUČAK	32
LITERATURA	33

## POPIS SLIKA

- Slika 1. Promjena mikrostrukture izazvane smicanjem
- Slika 2. Koloidna suspenzija čestica  $\text{SiO}_2$  u etilen glikolu
- Slika 3. a) Uređena orijentacija čestica; b) Neuređena orijentacija čestica prema teoriji „re-nered“
- Slika 4. Shema nastajanja hidroklastera izazvanog smicanjem
- Slika 5. Reološko ponašanje STF-a
- Slika 6. Trenutna konfiguracija hidroklastera u stvarnom prostoru
- Slika 7. Rezultat numeričke simulacije nastajanja mreže kontakata s povećanjem brzine smicanja
- Slika 8. (a) i (b) Dobivanje STF-om impregniranih tkanina ;(c) Morfologija površine tkanine prije i nakon nanošenja STF-a raspršivanjem
- Slika 9. Posmično zgušnjavanje STF-a kao zaštitni mehanizam od balističkog udara: stvaranje hidroklastera
- Slika 10. Prikaz poprečnog presjeka kompozita oštećenih uslijed balističkog udara
- Slika 11. Morfologija Kevlar® tkanine nakon balističkih testova
- Slika 12. Dijagram sila-produljenje za kompozitne uzorke E/9S
- Slika 13. Dijagram sila-produljenje za kompozitne uzorke E/3S 3SI 3S
- Slika 14. Dijagram sila-produljenje za kompozitne uzorke E/3S 3AI 3S
- Slika 15. Dijagram sila-produljenje za kompozitne uzorke E/3S 3BI 3S
- Slika 16. Dijagram sila-produljenje za kompozitne uzorke E/3S 3DI 3S
- Slika 17. Usporedba vrijednosti vlačne čvrstoće istraživanih kompozitnih materijala
- Slika 18. Literaturne vrijednosti vlačne čvrstoće kompozitnih materijala [59]
- Slika 19. Fotografije epruveta nakon ispitivanja udarnog rada loma
- Slika 20. Usporedba vrijednosti udarnog rada loma istraživanih kompozitnih materijala

## **POPIS TABLICA**

Tablica 1. Pregled materijala korištenih za pripremu kompozita za balističku zaštitu

Tablica 2. Svojstva i oznake korištenih tkanina

Tablica 3. Dimenzije epruveta za vlačni pokus

Tablica 4. Dimenzije epruveta za ispitivanje udarnog rada loma

Tablica 5. Rezultati statičkog vlačnog pokusa

Tablica 6. Rezultati ispitivanja udarnog rada loma



## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A		Aramidna tkanina
AI		Impregnirana aramidna tkanina
$b$	mm	Širina epruvete
B		Bazaltna tkanina
BI		Impregnirana bazaltna tkanina
CST		Kontinuirano posmično zgušnjavanje
D		Dyneema tkanina
DI		Impregnirana Dyneema tkanina
DST		Diskontinuirano posmično zgušnjavanje
E		Epoksidna matrica
EG		Etilen glikol
$F_{max}$	N	Maksimalna sila
$h$	mm	Debljina epruvete
PEG		Polietilen glikol
$R_m$	MPa	Vlačna čvrstoća
S		Staklena tkanina
SI		Impregnirana staklena tkanina
STF		Tekućina koja pokazuje posmično zgušnjavanje (engl. Shear thickening fluid)
STG		Gel koji pokazuje posmično zgušnjavanje (engl. Shear thickening gel)
UHMWPE		Polietilen ultravisoke molekulske mase
$\bar{x}$		Aritmetička sredina
$\dot{\gamma}_c$	$s^{-1}$	Kritična brzina smicanja
$\sigma_x$		Prosječno odstupanje od aritmetičke sredine

## SAŽETAK

Tekućine kod kojih viskoznost (pri konstantnoj temperaturi) ovisi o uvjetima tečenja (brzini smicanja, smičnom naprezanju) nazivaju se nenewtonske tekućine. Kad se viskoznost tekućine povećava s povećanjem smične brzine govori se o posmičnom zgušnjavanju/zadebljanju. Posmično zgušnjavajuća tekućina (engl. Shear-thickening fluid, STF) se pod primijenjenim naprezanjem, zbog povećanja viskoznosti, ponaša kao čvrsti materijali, a kada se opterećenje ukloni iz medija, STF prelazi u početno tekuće stanje. To jedinstveno svojstvo pobudilo je veliku pozornost znanstvenika fokusiranih na razvoj pametnih materijala i struktura za zaštitne primjene.

U ovom radu dan je prikaz dosadašnjih istraživanja polimernih kompozitnih materijala ojačanih tkaninama impregniranim s nenewtonskim (STF) tekućinama, te objašnjeni mehanizmi zaštite od kinetičkih penetratora.

Nadalje, istraživani su utjecaji impregnacije različitih tkanina (načinjenih od staklenih, aramidnih, bazaltnih i UHMWPE vlakana) nenewtonskom tekućinom koja pokazuje posmično zgušnjavanje (na temelju silicijevog dioksida i polietilen glikola) na svojstva epoksidnih kompozitnih materijala. Mehanička svojstva uzoraka procijenjena su pomoću vlačnog pokusa i ispitivanja udarnog rada loma.

**Ključne riječi:** nenewtonska tekućina, silicijev dioksid, polietilen glikol, ojačala, staklena vlakna, aramidna vlakna, bazalna vlakna, UHMWPE vlakna, epoksidna smola, polimerni kompozit; mehanička svojstva

## SUMMARY

Liquids whose viscosity (at constant temperature) depends on the flow conditions (shear rate, shear stress) are called non-Newtonian liquids. If the viscosity of the liquid increases with increasing shear rate, it is called a shear-thickening fluid. Shear-thickening fluid (STF) behaves like solid materials under applied stress due to the increase in viscosity, and when the load is removed from the medium, STF changes to the initial liquid state. This unique property has attracted a lot of attention from scientists focused on the development of smart materials and structures for protective applications.

In this paper, an overview of the current research on polymer composite materials reinforced with fabrics impregnated with non-Newtonian (STF) fluids is given, and the mechanisms of protection against kinetic penetrators are explained.

Furthermore, the influence of impregnation of different fabrics (made of glass, aramid, basalt and UHMWPE fibers) with a non-Newtonian liquid showing shear thickening (based on silica and polyethylene glycol) on the properties of epoxy composite materials was investigated. The mechanical properties of the samples were evaluated using a tensile test and an impact fracture test.

**Key words:** non-Newtonian fluid, silicon dioxide, polyethylene glycol, reinforced, glass fibers, aramid fibers, basalt fibers, UHMWPE fibers, epoxy resin, polymer composite, mechanical properties

## 1. UVOD

Tijekom godina, kompozitni materijali, posebice vlaknima ojačani polimerni kompoziti, stekli su popularnost u svim industrijskim sektorima (npr. u građevinarstvu, zrakoplovstvu, automobilske industriji, sektoru sportske opreme). Fizikalna i mehanička svojstva polimernih kompozita ovise o vrsti polimerne matrice, strukturi i sastavu ojačala, ali i međudjelovanjima na međufaznoj površini matrica/ojačalo. Polimerna matrica može biti plastomerni polimer (npr. polikarbonat, poliamid) ili duromerna smola (npr. epoksidna, poliesterska). Ojačala mogu biti u obliku tkanina (staklenih, ugljičnih, aramidnih ili hibridnih vlakana) ili praškastih punila raspršenih u matrici. Glavna funkcija ojačala u kompozitu je preuzimanje vanjskih opterećenja. Vlaknasta ojačala trebaju imati visoku vlačnu čvrstoću i Youngov modul elastičnosti, malo istezanje pri prekidu i nisku gustoću [1].

Kompoziti ojačani vlaknima visoke čvrstoće (npr. aramidnim) našli su primjenu u industriji oružja kao zamjena za čelik. Trenutno se kompoziti ojačani polimernim vlaknima koriste u industriji oružja za proizvodnju kaciga i umetaka za pancirne prsluke, balističkih štitova za laka oklopna vozila, patrolne brodove i helikoptere. Najveća prednost kompozita je njihova mala težina u odnosu na čelik [1]. U vojnim sukobima npr. tenkovi i borbena vozila ojačani čeličnim oklopom, zbog velike težine, teško izvode manevre i postaju laka meta za protutenkovsko oružje. Osim smanjene mobilnosti teška oklopna vozila karakterizira i velika potrošnja goriva.

Prva i najvažnija faza dizajniranja kompozitnih materijala za industriju oružja odabir je odgovarajuće matrice i ojačanja kako bi materijal bio što lakši, mehanički čvrst, ali i sposoban apsorbirati velike količine energije. Stoga industrija oružja traži nove materijale i konstrukcijska rješenja, što je također izazov za znanstvenike [2-4].

Novija istraživanja materijala za balističke štitove usmjeren je na razvoj hibridnih kompozita (materijala koji se sastoje od dvije ili više vrsta matrice i/ili ojačanja) [1].

Hibridni vlaknasti kompoziti dobivaju se modificiranjem matrice i ojačala, uvođenjem nanopunila u matricu, cijepljenjem nanopunila na površinu vlakana, impregniranjem vlaknastih tkanina newtonskim tekućinama koje pokazuju tzv. posmično zgušnjavanje (engl. Shear thickening fluid, STF) ili gelova koji zgušnjavaju uslijed smicanja (engl. Shear thickening gel, STG) ili korištenjem kombinacije ovih tehnika [1].

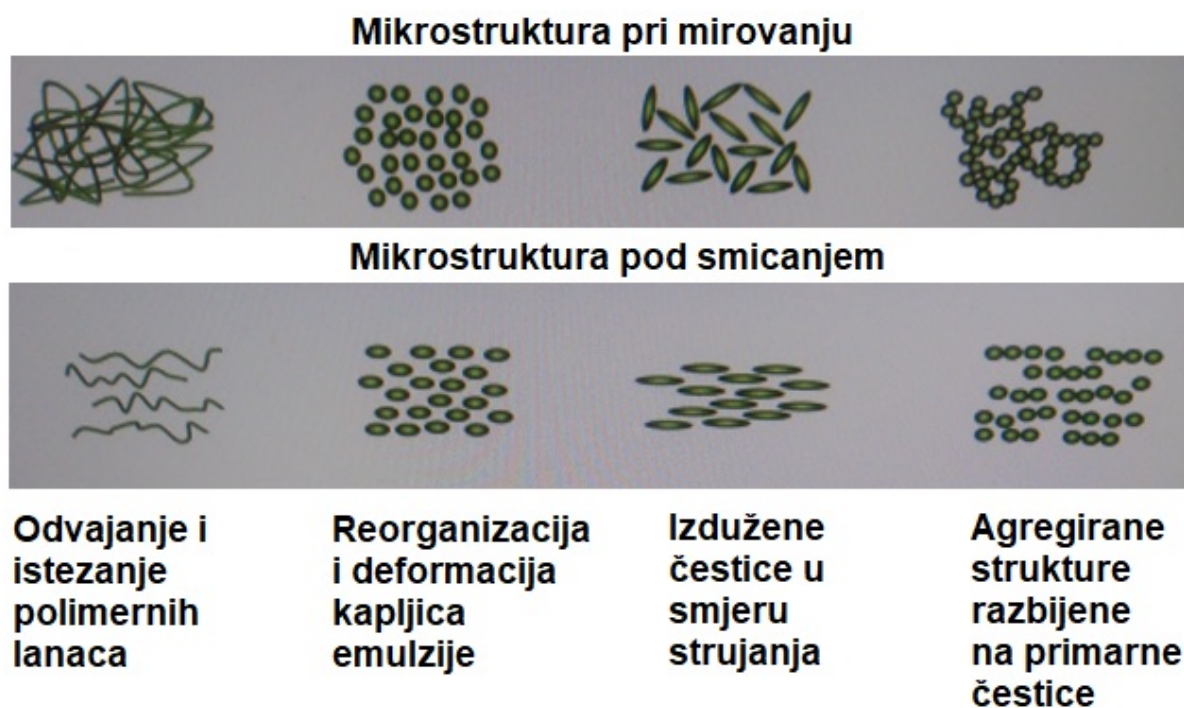
## 2. OPĆI DIO

### 2.1. Nenewtonske tekućine

Tekućine kod kojih viskoznost (pri stalnoj temperaturi) ovisi o uvjetima tečenja (brzini smicanja, smičnom naprezanju) nazivaju se nenewtonske tekućine.

Ako se viskoznost fluida smanjuje s povećanjem brzine smicanja govori se o tzv. posmičnom stanjivanju (eng. Shear thinning), a takvi fluidi nazivaju se pseudoplastičnim fluidima.

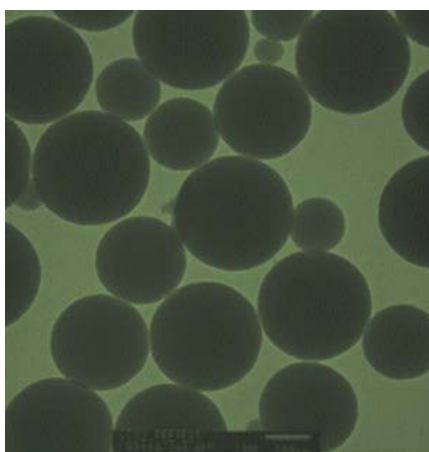
Posmično stanjivanje rezultat je mikrostrukturnih promjena izazvanih smicanjem (slika 1) i uobičajeno je za disperzije, uključujući emulzije i suspenzije, kao i za polimerne otopine i taline [5].



Slika 1. Promjena mikrostrukture izazvane smicanjem [5].

Kad se viskoznost fluida povećava s povećanjem smične brzine riječ je o tzv. posmičnom zgušnjavanju/zadebljanju (eng. Shear thickening), a takvi fluidi nazivaju se dilatantni fluidi [1]. I pseudoplastični i dilatantni fluidi spadaju u skupinu vremenski neovisnih fluida, što znači da njihova viskoznost ne ovisi o vremenu djelovanja smične sile.

Pokazalo se da koncentrirane koloidne suspenzije koje se sastoje od čvrstih čestica raspršenih u tekućem mediju (slika 2) iznad tzv. kritičnog smičnog napreznja, ili kritične brzine smicanja,  $\gamma_c$ , pokazuju zgušnjavanje smicanjem, što rezultira velikim, ponekad diskontinuiranim povećanjem viskoznosti [6]. Iste te suspenzije pri manjim brzinama smicanja mogu pokazivati posmično stanjivanje [6].



Slika 2. Koloidna suspenzija čestica  $\text{SiO}_2$  u etilen glikolu [6].

### 2.1.1. Posmično zgušnjavajuće tekućine

Posmično zgušnjavajuća tekućina (STF) se pod primijenjenim napreznjem, zbog povećanja viskoznosti, ponaša kao čvrsti materijali, a kada se opterećenje ukloni iz medija, STF prelazi u početno tekuće stanje. To jedinstveno svojstvo ovih tekućina pobudilo je veliku pozornost znanstvenika fokusiranih na razvoj pametnih materijala i struktura za zaštitne primjene.

Zbog izvrsne apsorpcije i raspršivanja energije STF se naširoko koristi u Li-ion baterijama [7], nosivim uređajima [8], triboelektričnom nanogeneratoru [9], zaštitnim strukturama [10,11].

Pokazalo se da STF-ovi mogu apsorbirati udarne valove od potresa ili jakih vjetrova. U strojevima, STF-ovi mogu poboljšati otpornost na vibracije i oštećenja. U medicinskoj opremi, STF-ovi se predlažu za imobilizaciju ramena, koljena, laktova, gležnjeva i kukova [12].

Prema reološkim svojstvima STF-ovi se mogu podijeliti u dvije skupine: tekućine s kontinuiranim posmičnim zgušnjavanjem (CST) i tekućine s diskontinuiranim posmičnim zgušnjavanjem (DST) [13-15]. Kritična brzina smicanja definirana je kao vrijednost brzine smicanja pri kojoj se opaža nagli porast viskoznosti kad STF prelazi iz tekućeg stanja u gotovo čvrsto stanje [17,18].

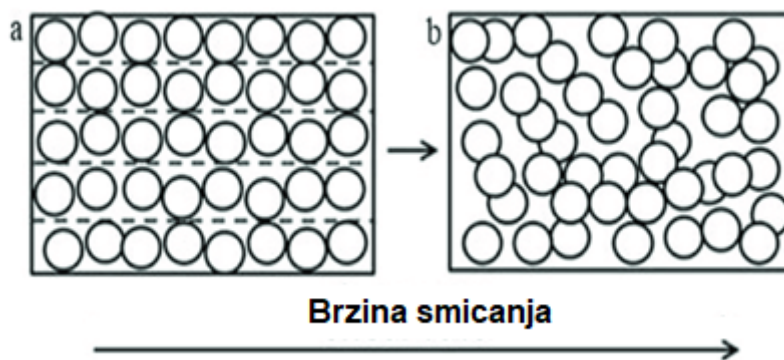
Na reološka svojstva STF-a utječu mnogi čimbenici kao što su: volumni udjel čestica, omjer dimenzija čestica ( $L/D$ ), međudjelovanja čestica-čestica, tvrdoća, hrapavost, veličina čestica, raspodjela veličine čestica, modifikacija čestica, tekući medij, pH vrijednost, temperatura i aditivi [12,19]. Tekući medij u kojem su suspendirane čestice može biti voda, etilen glikol (EG), a najčešće se koristi polietilen glikol (PEG) [20].

### 2.1.1.1. Mehanizmi posmičnog zgušnjavanja

Tijekom proteklih nekoliko desetljeća, proučavani su različiti mehanizmi posmičnog zgušnjavanja koji uključuju tzv. prijelaz red-nered, hidro-klasteriranje, ometanje i teoriju kontakata (trenje).

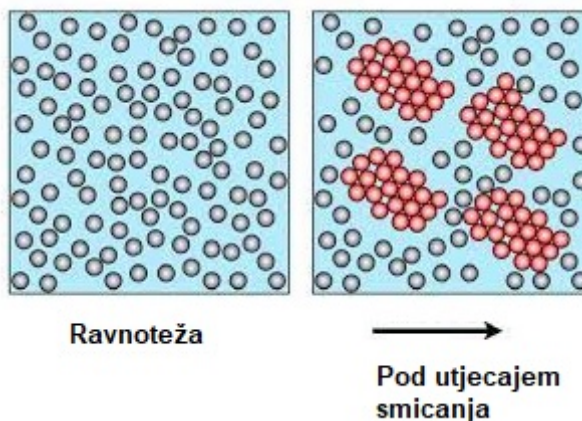
#### Teorija prijelaza "red-nered"

Hoffman [21] je istovremeno pratio promjene u viskoznosti i rasipanju svjetlosti disperznog sustava. Na temelju dobivenih rezultata prvi je predložio teoriju prijelaza iz reda u nered prema kojoj čestice u STF-u tvore uređenu slojevit (lamelarnu) strukturu ispod kritične brzine smicanja (slika 3 a), a pri većim smičnim brzinama ta uređena struktura nestaje (slika 3 b). Nastajanjem neuređene strukture remeti se tok fluida što rezultira povećanjem viskoznosti suspenzije. [21].



Slika 3. a) Uređena orijentacija čestica; b) Neuređena orijentacija čestica prema teoriji „red-nered“

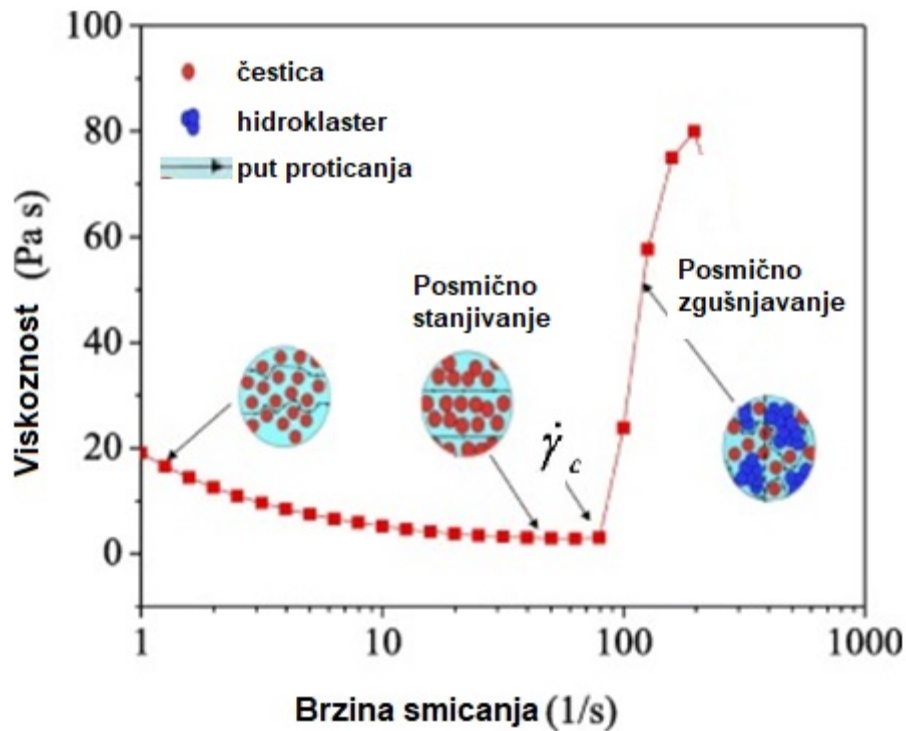
Brady i sur. [22] i Butera i sur. [23] otkrili su da se prijelaz red–nered ne javlja tijekom svih pojava posmičnog zgušnjavanja. Bossis i sur. [24] su otkrili da posmično zgušnjavanje ovisi o formiranju velikih klastera (slika 4), a ne o prijelazu red-nered.



**Slika 4. Shema nastajanja hidroklastera izazvanog smicanjem [25]**

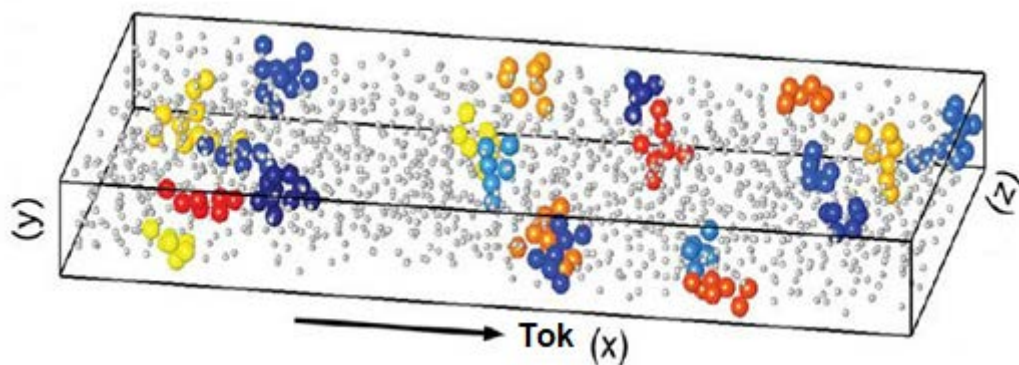
Mehanizam hidro-klasteriranja predlaže da se čestice STF-a spajaju u klustere pod smicanjem, kao rezultat hidrodinamičkih sila koje mogu nadvladati odbojne sile među susjednim česticama. U slučaju iznenadne kritične brzine smicanja, zbog energije iznenadnog udarca koja premašuje odbojne sile između čestica, čestice u STF-u se vežu zajedno u hidroklastere [12]. Tipično reološko ponašanje STF-a prikazuje slika 5 [26]. Kada je brzina smicanja niska, „poremećeni“ disperzni sustav može se brzo vratiti u svoje prvobitno stanje pod djelovanjem Brownovog gibanja i međumolekularnih sila, a vrijednost viskoznosti je mala i stabilna. S povećanjem brzine smicanja naprezanje između raspršenih čestica počinje biti veće od sila između čestica a disperzni sustav ne može u potpunosti savladati promjenu prostorne strukture uslijed vanjskog utjecaja i dolazi do posmičnog stanjivanja (slika 5). Kada se brzina smicanja dalje povećava do kritične vrijednosti,  $\gamma_C$ , sila fluida je znatno veća od međumolekularnih sila između čestica i Brownovog gibanja. To potiče formiranje hidroklastera i viskoznost sustava se trenutačno povećava (posmično zgušnjavanje, slika 5). Međutim, struktura hidroklastera je nestabilna, a prostorna mreža se urušava odmah nakon što se vanjski učinak smicanja primijenjen na sustav smanji ili nestane.





Slika 5. Reološko ponašanje STF-a [26]

Cheng i sur. [27] vizualizirali su i identificirali hidroklastere kao početak zgušnjavanja u STF-u (čestice silicijevog dioksida u mješavini vode i glicerina) pomoću brze konfokalne mikroskopije uz istodobna mjerenja sile. Slika 6 prikazuje trenutnu konfiguraciju hidroklastera u stvarnom prostoru, a različite boje označavaju različite klustere.



Slika 6. Trenutna konfiguracija hidroklastera u stvarnom prostoru [27]

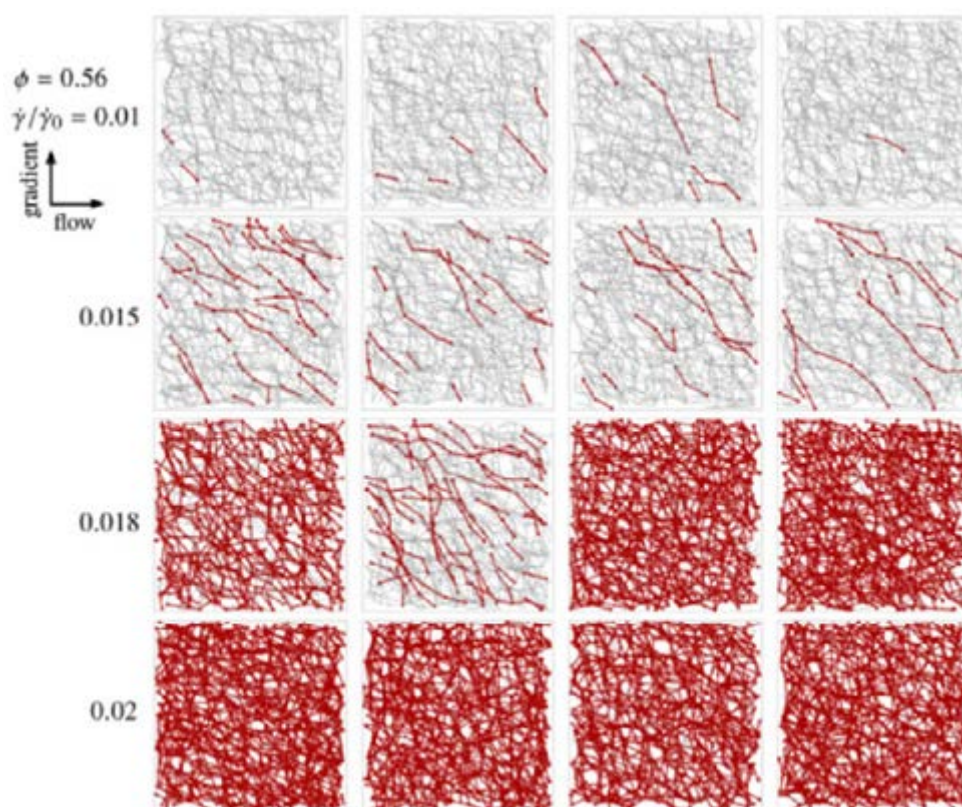
### Teorija ometanja

Teorija hidroklasteriranja, koja je uspješno objasnila kontinuirano povećanje viskoznosti, nije uspjela objasniti diskontinuirano povećanje viskoznosti za nekoliko redova veličina, tipično

za prijelaz tekućina-krutina. Za objašnjenje diskontinuiranog porasta viskoznosti suspenzije koristi se tzv. teorija ometanja [28], prema kojoj krute čestice disperzne faze spontano agregiraju i stvaraju lokalnu blokadu tečenju.

### Teorija kontakata (trenja)

Teorija kontakata pokušava objasniti odnos između CST i DST. Kako se brzina smicanja povećava, može doći do nestanka tekućeg filma između čestica, što rezultira većim brojem kontakata između čestica, povećanim trenjem, a što može inducirati formiranje mreže kontakata. Mari i Seto [29] simulirali su proces nastajanja mreže kontakata s povećanjem brzine smicanja pomoću numeričkog modela.

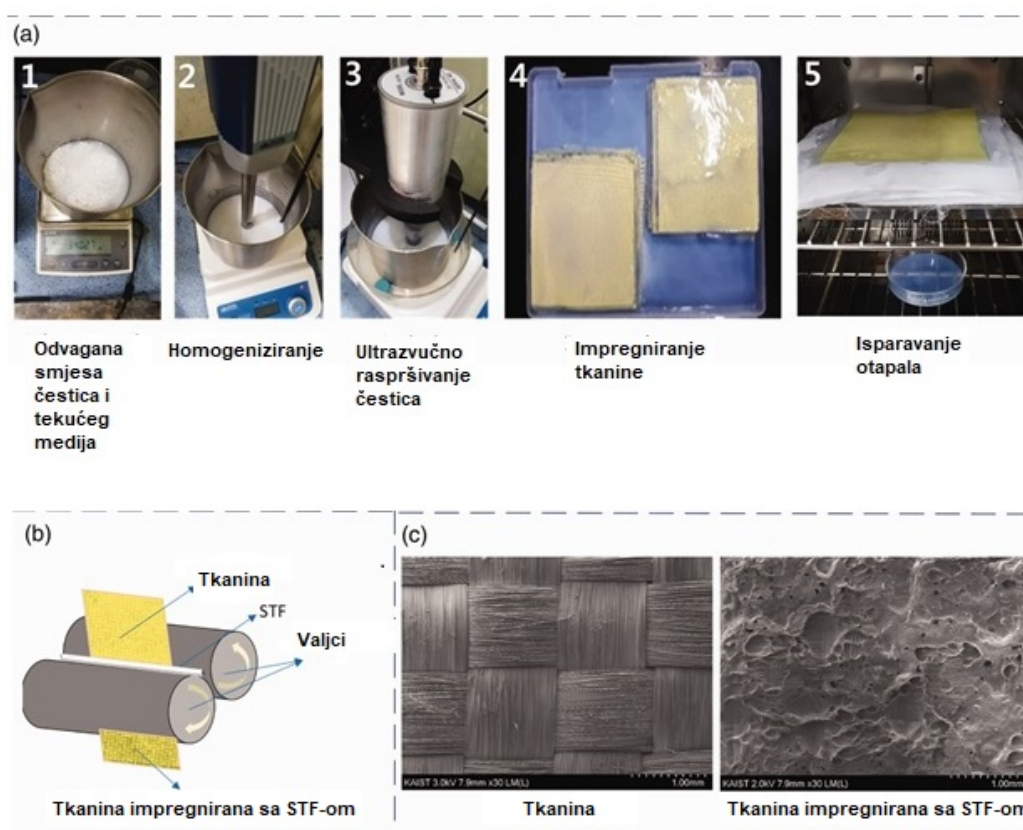


**Slika 7. Rezultat numeričke simulacije nastajanja mreže kontakata s povećanjem brzine smicanja [29].**

Na slici 7 beskontaktno čestice povezane su sivim linijama, a crvena linija označava interakciju kontaktnih čestica. Kontaktne mreže otporne su na smicanje te dolazi do porasta viskoznosti i prestanka tečenja.

## 2.2. Priprava kompozitnih materijala za balističku zaštitu

U inženjerskim primjenama, tkanine od vlakana visoke čvrstoće uvelike se koriste u strukturnim komponentama izloženim udarcima. Radi povećanja otpornosti na udarce na tkanine se nanosi STF. Kako bi se olakšala impregnacija tkanine STF se može razrijediti otapalom (npr. etanolom) koje se potom uklanja zagrijavanjem (slika 8 (a)). Radi što boljeg prodora STF-a u tkaninu može se koristiti istiskanje pomoću valjaka (slika 8 (b)). STF se može i ručno nanijeti ili raspršiti na površinu tkanine (slika 8 (c)), međutim, takvi postupci ne jamče ravnomjerni premaz i kvantitativnu kontrolu.



Slika 8. (a) i (b) Dobivanje STF-om impregniranih tkanina [30,31];(c) Morfologija površine tkanine prije i nakon nanošenja STF-a raspršivanjem [32].

## 2.3. Pregled dosadašnjih istraživanja kompozitnih materijala za balističku zaštitu

Prva istraživanja balističkog ponašanja STF-om (čestice silicijevog dioksida (450 nm) raspršene u etilen glikolu, EG) impregniranih Kevlar® tkanina objavljena su 2003. godine [6]. Rezultati su ukazali na značajno povećanje otpornosti materijala na balističko probijanje

zbog impregnacije tkanine STF-om, bez ikakvog gubitka fleksibilnosti materijala. U tablici 1 [33] dan je sažeti pregled materijala korištenih u pripravi kompozita za balističku zaštitu. Kao što se vidi iz tablice 1 [33] u velikom broju radova analizirane su komercijalne aramidne tkanine (Kevlar®, Du Pont; Twaron®, Teijin) impregnirane STF-om na temelju nanočestica silicijevog dioksida, SiO<sub>2</sub> u PEG tekućini. Maseni udio čestica silicijevog dioksida varirao je između 0 do 70 %, a najzastupljeniji tekući medij je PEG molekulske mase 200 g/mol (PEG 200). Veća molekulska masa polimera podrazumijeva i veću viskoznost STF-a.

Tablica 1. Pregled materijala korištenih za pripremu kompozita za balističku zaštitu [33]

Autori	Ploča/Tkanina	Čestice	Tekućina	Udio čestica u tekućini mas. %
Levinsky i sur. [34]	Aramid	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	PVAc	3
Grineviciute i sur. [35]	Aramid	H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub> akrilat	voda	5
Haro i sur. [36]	Aramid Al ploče	+ SiO <sub>2</sub>	PEG 400	50
Olszewska i sur. [37]	UHMWPE	SiO <sub>2</sub>	PPG 400	25
Tria i sur. [38]	Aramid	SiO <sub>2</sub>	PEG	-
Cho i sur. [39]	Hanji papir	Kukuruzni škrob	voda	55
Yeh i sur. [40]	Aramid	SiO <sub>2</sub>	PEG 200	20, 30, 40 i 50
Yeh i sur. [41]	Aramid	SiO <sub>2</sub>	PEG 200	40
Liu i sur. [42]	Aramid	SiO <sub>2</sub> GO CNT	PEG 200	20
Chang i sur. [43]	Aramid	SiO <sub>2</sub>	PEG 200	40
Jeddi i sur. [44]	E-staklo Al ploča	+ SiO <sub>2</sub>	PEG 400	20
Katiyar i sur. [45]	Aramid	SiO <sub>2</sub>	PEG 400	25
Zhang et al. [46]	Aramid	SiO <sub>2</sub>	PEG 200	0 i 70
Bablu i Naminala [47]	Aramid	SiO <sub>2</sub>	voda	0, 10, 30 i 40
Hasan-Nezhad i sur. [48]	E-staklo	SiO <sub>2</sub>	PEG 400	30, 40, 50 i 60
Kubit i sur. [49]	Aramid čelična ploča	+ SiO <sub>2</sub>	EG	5
Mahesh i sur. [50]	Juta	SiO <sub>2</sub>	PEG	10, 20, 30 i 40
Mishra i sur. [51]	UHMWPE	SiO <sub>2</sub>	PEG 400	40
Xu i sur. [52]	Aramid	SiO <sub>2</sub> B <sub>4</sub> C	PEG 200	SiO <sub>2</sub> – 0 i 25 B <sub>4</sub> C – 0, 5, 10 i 15
Zhihao i sur. [53]	Aramid	SiO <sub>2</sub>	PEG 200	20
Zhang i sur. [54]	UHMWPE	SiO <sub>2</sub>	PEG 600	50
Bajya i sur. [55]	UHMWPE	SiO <sub>2</sub>	PEG 200	65

Yeh i sur. [40] istraživali su probodno i balističko ponašanje laminata načinjenog od slojeva aramidne tkanine (Kevlar®) impregnirane SiO<sub>2</sub>/PEG STF-om, koristeći različite udjele čestica (između 20 do 50 mas.%). Autori su proveli balističke testove koristeći kuglice od ugljičnog čelika (mase 2 g, promjera 8 mm) s početnom brzinom od oko 180 ms<sup>-1</sup>. Rezultati balističkog ispitivanja pokazali su povećanu apsorpciju energije laminata načinjenog od četiri impregnirane tkanine, za oko 16% , u odnosu na laminat koji je načinjen od četiri neimpregnirane tkanine.

Chang i sur. [43] razvili su hibridne kompozite načinjene od slojeva Kevlar® tkanine impregnirane poliureom i slojeva saćastog papira impregniranog sa STF-om (40 mas.% SiO<sub>2</sub>/PEG 200). Rezultati balističkog testa provedenog sa streljivom od 9 mm pokazali su da je impregnacija Kevlar® tkanine poliureom rezultirala lakšim materijalom, sa superiornim balističkim izvedbama, u usporedbi s laminatom načinjenim od čiste (neimpregnirane) Kevlar® tkanine. Dodavanje jednog sloja saćastog papira impregniranog STF-om između slojeva Kevlar® tkanine rezultiralo je poboljšanjem balističke čvrstoće. U usporedbi s laminatom sastavljenim od 47 slojeva Kevlar® tkanine, impregniranih poliureom, laminat Kevlar®/saćasti papir/STF od 33 sloja (32 sloja Kevlar® tkanine + 1 sloj saćastog papira impregniranog STF-om) pokazao je sličnu balističku izvedbu, što je rezultiralo njegovom manjom debljinom i gustoćom.

Zhihao i sur. [53] istraživali su utjecaj temperature u rasponu između -50 °C i 100 °C na udarnu čvrstoću Kevlar® tkanine impregnirane STF-om, radi moguće primjene u proizvodnji kućišta motora zrakoplova. Analizirali su Kevlar® tkaninu (241,2 g/m<sup>2</sup>) impregniranu STF-om koji sadrži 20 mas. % nanočestica silicijevog dioksida (100 nm) u PEG 200. Rezultati su pokazali dramatičan utjecaj temperature i na STF i na Kevlar® tkaninu.

Katihar i sur. [45] usredotočili su se na istraživanje učinka funkcionalizacije SiO<sub>2</sub> čestica, u SiO<sub>2</sub>/PEG 400 STF-u, pomoću aminosilana. Kako bi definirali sadržaj STF-a koji će biti impregniran u Kevlar® tkaninu, autori su proveli reološke testove kako bi potvrdili zgušnjavanje tekućina uslijed povećanja brzine smicanja. Reološka ispitivanja su pokazala da je funkcionalizacija SiO<sub>2</sub> aminosilanom rezultirala značajnim povećanjem viskoznosti. Nefunkcionalizirani STF s 25 mas.% SiO<sub>2</sub> imao je viskoznost od približno 18 Pas pri brzini smicanja od 2000 s<sup>-1</sup>, dok je STF s istim sadržajem funkcionaliziranog SiO<sub>2</sub> pokazao



viskoznost od približno 1850 Pas pri brzini smicanja manjoj od  $100 \text{ s}^{-1}$ . Balistička ispitivanja laminata načinjenih od četiri i osam slojeva Kevlar® tkanine, impregnirane s funkcionaliziranim STF-om, provedena uz različite brzina udarca s projektilom promjera 9,5 mm i mase 7 g, pokazala su da je STF pridonio poboljšanju balističkih izvedbi u usporedbi s laminatima bez prisutnosti STF-a. U usporedbi s početnom brzinom od oko  $154 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , rezidualna brzina smanjila se za oko 22% dok se apsorpcija energije povećala za 32% [45]

Bablu i Manimala [47] istraživali su Kevlar® tkanine impregnirane STF-om koristeći vodu kao tekući medij za dispergiranje nanočestica  $\text{SiO}_2$ . Priređeni su STF-ovi s različitim udjelima  $\text{SiO}_2$  u vodi (10, 30 i 40 mas. %). Autori su izvijestili da je laminat načinjen od četiri sloja Kevlar® tkanine, impregnirane sa STF-om koji sadrži 40 mas. % čestica, pokazao veću apsorpciju energije u usporedbi s laminatom načinjenim od sedam slojeva neimpregnirane Kevlar® tkanine, što je rezultiralo 17,3% lakšim materijalom.

Levinsky i sur. [34] su istraživali balističku izvedbu polikarbonatnih (PC) ploča debljine 4 i 5 mm, povezanih s Twaron® tkaninama impregniranim sa STF-om, a koji se sastojao od čestica aluminijskog oksida ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) raspršenih u polivinil acetatu (PVAc). Balistička ispitivanja provedena su s čeličnim projektilima promjera 8 mm različitih početnih brzina. Autori su izvijestili da je dodavanje jednog sloja Twaron®+STF smanjilo dubinu prodiranja za 35,5% tijekom ispitivanja s pločama debljine 4 mm. Za ploče debljine 5 mm, dodatak tkanine impregnirane STF-om smanjio je dubinu prodiranja za 20,8%.

Mishra i sur. [51] procijenili su balističku izvedbu UHMWPE laminata impregniranih sa STF-om (40 mas.%  $\text{SiO}_2$  u PEG 400) mijenjajući broj slojeva (5, 10, 20 i 30). Balistička ispitivanja su provedena korištenjem Al projektila, mase 4 g i duljine 20 mm, s brzinom u rasponu od 250 do  $700 \text{ ms}^{-1}$ . U usporedbi s laminatima načinjenim od neimpregniranih tkanina, UHMWPE laminati načinjeni od impregniranih tkanina pokazali su veću apsorpciju energije, uz sve primijenjene brzine projektila, kao i veće vrijednosti apsorbirane energije s povećanjem broja slojeva.

Hasan-nezhad i sur. [48] istraživali su učinak modificiranja nanočestica  $\text{SiO}_2$  pomoću trietoksisilana na balističku izvedbu staklenih tkanina. Staklene tkanine impregnirane su STF-om koji je sadržavao 30, 40, 50 i 60 mas. % tretiranih čestica  $\text{SiO}_2$  i STF-om koji je sadržavao 30 mas.% netretiranih čestica. Balistička ispitivanja impregniranih tkanina

provedena su pomoću projektila mase 5,25 g i promjera 8 mm, brzine  $130 \text{ ms}^{-1}$ . Rezultati balističkog testa pokazali su da je laminat sastavljen od tkanina staklenih vlakana, impregniranih STF-om koji je sadržavao 30 mas.% tretiranih čestica, učinkovitiji od onog sastavljenog od tkanina impregniranih sa STF-om koji sadrži isti udio netretiranih čestica.

## 2.4. Mehanizmi zaštite od kinetičkih penetratora

Učinkovitost materijala u zaustavljanju proboja projektila ovisi o njihovoj sposobnosti da apsorbiraju odnosno rasprše kinetičku energiju projektila. Poboljšanje otpornosti na udar može biti kombinirani učinak različitih mehanizama. U literaturi [56] se navode sljedeći mehanizmi za poboljšane apsorpcije energije u tkaninama impregniranim STF-om:

- *Rasipanje energije zbog posmičnog zgušnjavanja*

Usljed naprezanja STF se počinje ponašati kao čvrsti materijal i omogućuje impregniranoj tkanini da apsorbira više energije.

- *Povećano trenje pređe o pređu*

Povećano trenje rezultira manjom pokretljivošću pređe pri većim brzinama deformacije i može dovesti do povećanja energije potrebne za izvlačenje pređe.

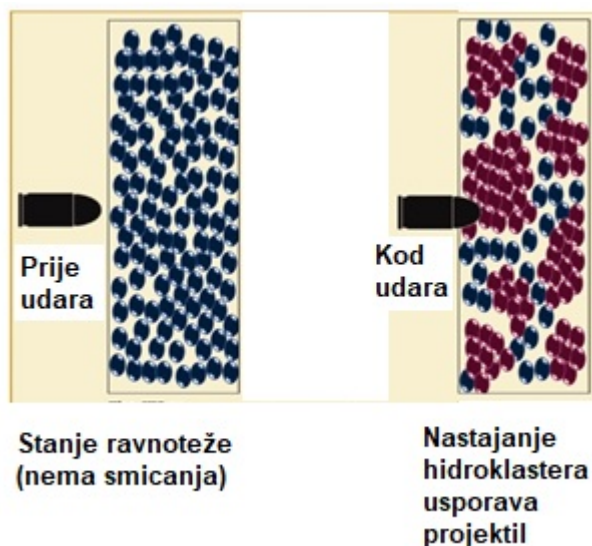
- *Bolje spajanje i prijenos opterećenja s vlakna na vlakno i s pređe na pređu*

STF funkcionira kao matrica koja međusobno povezuje vlakna u jedinstvenu strukturu, čime se povećava broj vlakana/niti koje su uključene u apsorpciju energije.

Ovisno o brzini projektila i posljedično stvorenim brzinama smicanja, pojedini mehanizam može imati prevagu nad drugim.

Chatterjee i sur. [57] također pripisuju poboljšanu apsorpciju energije kompozita posmičnom zgušnjavanju i dovoljno visokoj potpornoj krutosti STF-a, zbog stvaranja hidroklastera (slika 9).





**Slika 9. Posmično zgušnjavanje STF-a kao zaštitni mehanizam od balističkog udara: stvaranje hidroklastera [57]**

Smicanje slojeva STF matrice i tkanine uslijed udara projektila može dovesti i do loma vlakana. Razaranje smicanjem apsorbira također energiju projektila, a istezanje vlakna u području udara projektila može rezultirati delaminacijom na međupovršini (slika 10) [57].



**Slika 10. Prikaz poprečnog presjeka kompozita oštećenih uslijed balističkog udara [57]**

Slika 11 prikazuje izgled neimpregnirane Kevlar® tkanine te tkanina impregniranih sa STF-om (suspenzijom čestica silicijevog dioksida u PEG-u) nakon balističkog testa [58]. Vidi se da kod tkanina impregniranih sa STF-om koji sadrži 35 odnosno 45 mas.% nanočestica  $\text{SiO}_2$  nije

došlo do izvlačenja pređe, dok su kod neimpregnirane tkanine neka vlakna izvučena iz tkanine.



Slika 11. Morfologija Kevlar® tkanine nakon balističkih testova [58].

### 3. EKSPERIMENTALNI DIO

#### 3.1. Materijali

U ovom radu istraživani su višeslojni kompozitni materijali na temelju epoksidne smole (E) i tkanina različitih vlakana (tablica 2) koje su prethodno impregnirane nenewtonskom tekućinom (STF, suspenzija čestica SiO<sub>2</sub> u PEG-u).

**Tablica 2. Svojstva i oznake korištenih tkanina**

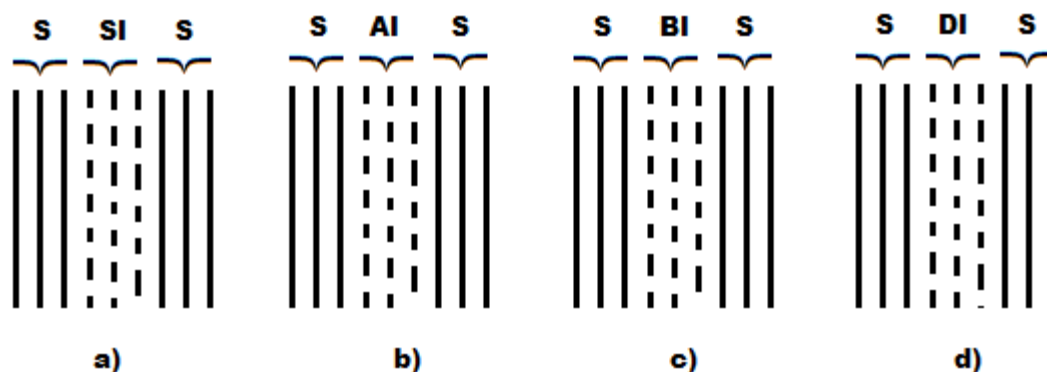
<b>Tkanina</b>	<b>Gustoća g/m<sup>2</sup></b>	<b>Oznaka</b>
staklo	600	S
aramid	176	A
bazalt	300	B
Dyneema (polietilen ultra visoke molekulske mase)	176	D

#### 3.2. Impregniranje ojačala nenewtonskom tekućinom

U polietilen glikol (PEG 400, MW: 400,00, GPR Rectapur, VWR International, Rosny-sous-Bois-cedex, Francuska) dodan je SiO<sub>2</sub> (AEROSIL 300, Degussa-Hüls AG, Frankfurt, Njemačka u količini od 30 mas. %. Homogenizacija suspenzije postignuta je postupnim dodavanjem SiO<sub>2</sub> uz konstantno miješanje magnetnom miješalicom te povremeno korištenje ultrazvučne sonde. Kako bi se suspenzija / pasta mogla utisnuti u tkanine, suspenzija je razrijeđena dodatkom etanola (96 % etanol, Ph. Eur. / p.a., LabExpert, KEFO d.o.o., Ljubljana, Slovenija). Volumen dodanog etanola u odnosu na volumen korištenog PEG400 bio je 1:1. Homogenizirana pasta je korištenjem špatule i valjka utisnuta u tkanine s obje strane nakon čega su tkanine sušene pri sobnoj temperaturi. Oznake za tkanine od staklenih, aramidnih, bazaltnih i Dyneema vlakana impregniranih STF-om su: SI, AI, BI i DI.

### 3.3. Priprava kompozitnih materijala

Za pripravu kompozitnih materijala na temelju epoksidne smole i ojačala (tkanina načinjenih od vlakana) korišten je postupak vakuumske infuzije. Kao referentni sustav načinjen je epoksidni kompozit ojačan s 9 slojeva neimpregniranih staklenih tkanina (E/9S). Ostale kombinacije tkanina u matrici epoksidne smole prikazuje shema 1:



Shema 1. Ojačanja u epoksidnoj matrici: a) 3 sloja neimpregnirane staklene tkanine (S) +3 sloja impregnirane staklene tkanine (SI) +3 sloja neimpregnirane staklene tkanine (S); b) 3 sloja neimpregnirane staklene tkanine +3 sloja impregnirane aramidne tkanine (AI) +3 sloja neimpregnirane staklene tkanine; c) 3 sloja neimpregnirane staklene tkanine +3 sloja impregnirane bazaltne tkanine (BI) +3 sloja neimpregnirane staklene tkanine; d) 3 sloja neimpregnirane staklene tkanine +3 sloja impregnirane Dyneema tkanine +3 sloja neimpregnirane staklene tkanine.

Oznake za odgovarajuće epoksidne kompozite dobivene vakuumskom infuzijom ojačanja (tkanina) prikazanih na shemi 1 su:

- a) E/3S 3SI 3S
- b) E/3S 3AI 3S
- c) E/3S 3BI 3S
- d) E/3S 3DI 3S

### 3.4. Određivanje mehaničkih svojstava kompozitnih materijala

Nakon polimerizacije i očvršćivanja epoksidne smole, radi određivanja mehaničkih svojstava materijala, iz dobivenih ploča (150 x 150 mm) izrezane su epruvete odgovarajućih dimenzija i oblika, u skladu s normama.

#### 3.4.1. Statički vlačni pokus

Statički vlačni pokus proveden je na univerzalnoj kidalici u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Pri ispitivanju, epruveta se pozicionira i steže u čeljusti stroja, te konstantno vlačno opterećuje sve dok ne dođe do loma epruvete. Pokus je ponavljan tri puta. Dimenzije epruveta (širina epruvete –  $b$  i debljina epruvete –  $h$ ) mjerene na sredini svake epruvete dane su u Tablici 3.

**Tablica 3. Dimenzije epruveta za vlačni pokus**

Broj epruvete	KOMPOZIT									
	E/9S		E/3S 3SI 3S		E/3S 3AI 3S		E/3S 3BI 3S		E/3S 3DI 3S	
	Dimenzije eprueta		Dimenzije epruveta		Dimenzije epruveta		Dimenzije epruveta		Dimenzije epruveta	
	Širina $b$ (mm)	Debljina $h$ (mm)	Širina $b$ (mm)	Debljina $h$ (mm)	Širina $b$ (mm)	Debljina $h$ (mm)	Širina $b$ (mm)	Debljina $h$ (mm)	Širina $b$ (mm)	Debljina $h$ (mm)
1	9,67	4,33	10,66	5,22	9,76	4,42	10,50	4,40	9,88	4,47
2	10,50	4,47	10,37	4,89	10,39	4,47	10,00	4,43	10,52	4,52
3	10,47	4,59	10,74	4,88	10,00	4,60	10,57	4,56	10,59	4,39

### 3.4.2. Ispitivanje udarnog rada loma

Za ispitivanje udarnog rada loma korišten je Charpy-jev bat. Ispitivanje udarnog rada loma Charpyjevom batom propisano je normom HRN EN ISO 148-1. Epruveta četvrtastog poprečnog presjeka se oslanja na dva oslonca, te udarnoopterećuje udarcem brida bata. Ispitivane su epruvete sa zarezom, dubine 2mm, a pokus je ponavljan tri puta. Dimenzije epruveta dane su u Tablici 4.

**Tablica 4. Dimenzije epruveta za ispitivanje udarnog rada loma**

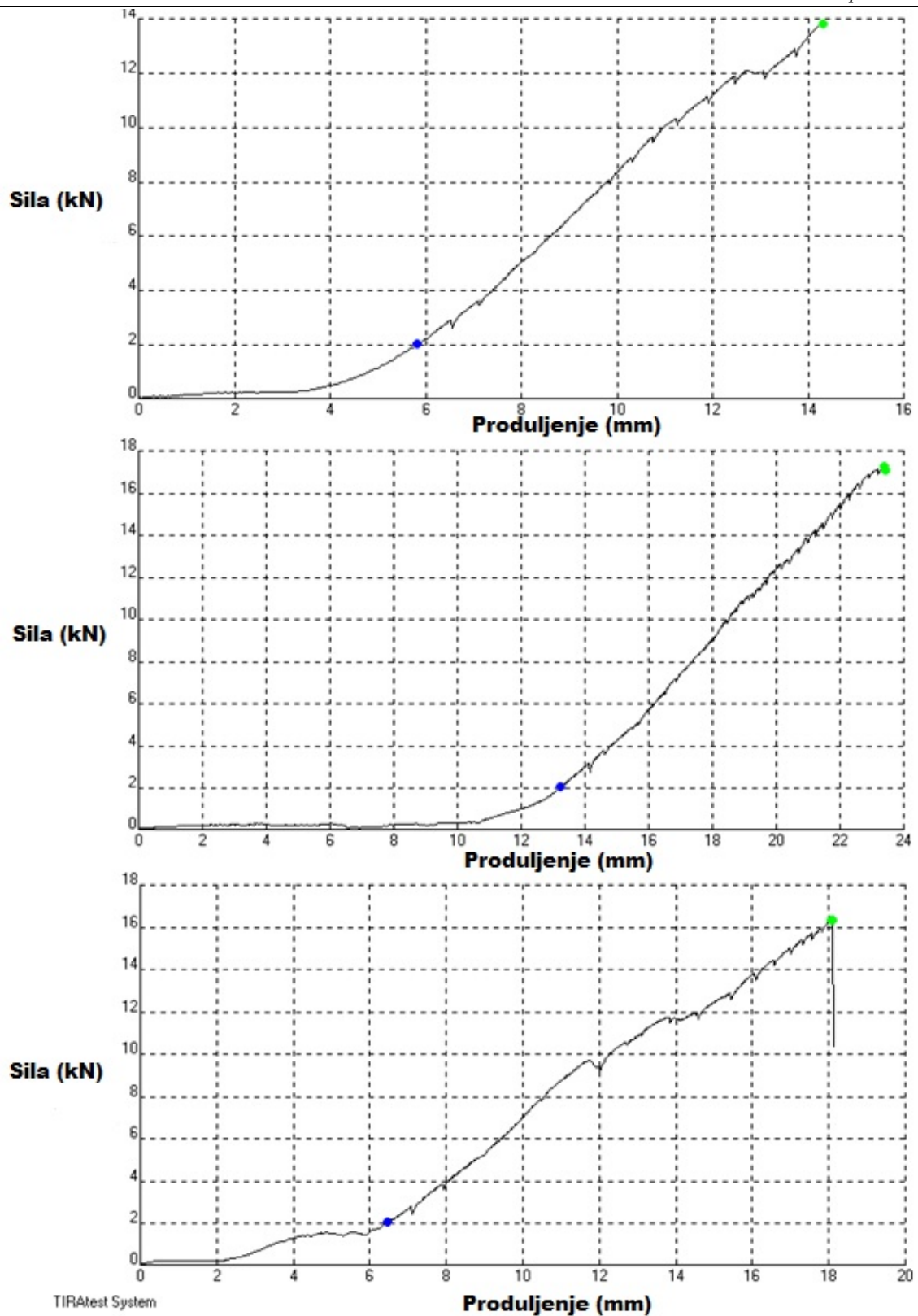
Broj epruvete	KOMPOZIT									
	E/9S		E/3S 3SI 3S		E/3S 3AI 3S		E/3S 3BI 3S		E/3S 3DI 3S	
	Dimenzije eprueta		Dimenzije epruveta		Dimenzije epruveta		Dimenzije epruveta		Dimenzije epruveta	
	Širina <i>b</i> (mm)	Debljina <i>h</i> (mm)	Širina <i>b</i> (mm)	Debljina <i>h</i> (mm)	Širina <i>b</i> (mm)	Debljina <i>h</i> (mm)	Širina <i>b</i> (mm)	Debljina <i>h</i> (mm)	Širina <i>b</i> (mm)	Debljina <i>h</i> (mm)
1	10,8	4,4	11,1	5,0	10,8	4,6	10,5	4,5	10,6	4,3
2	10,4	4,5	10,8	4,9	10,6	4,5	10,4	4,3	10,3	4,4
3	10,8	4,4	11,0	4,9	10,2	4,6	11,0	4,2	10,6	4,3

---

## **4. REZULTATI**

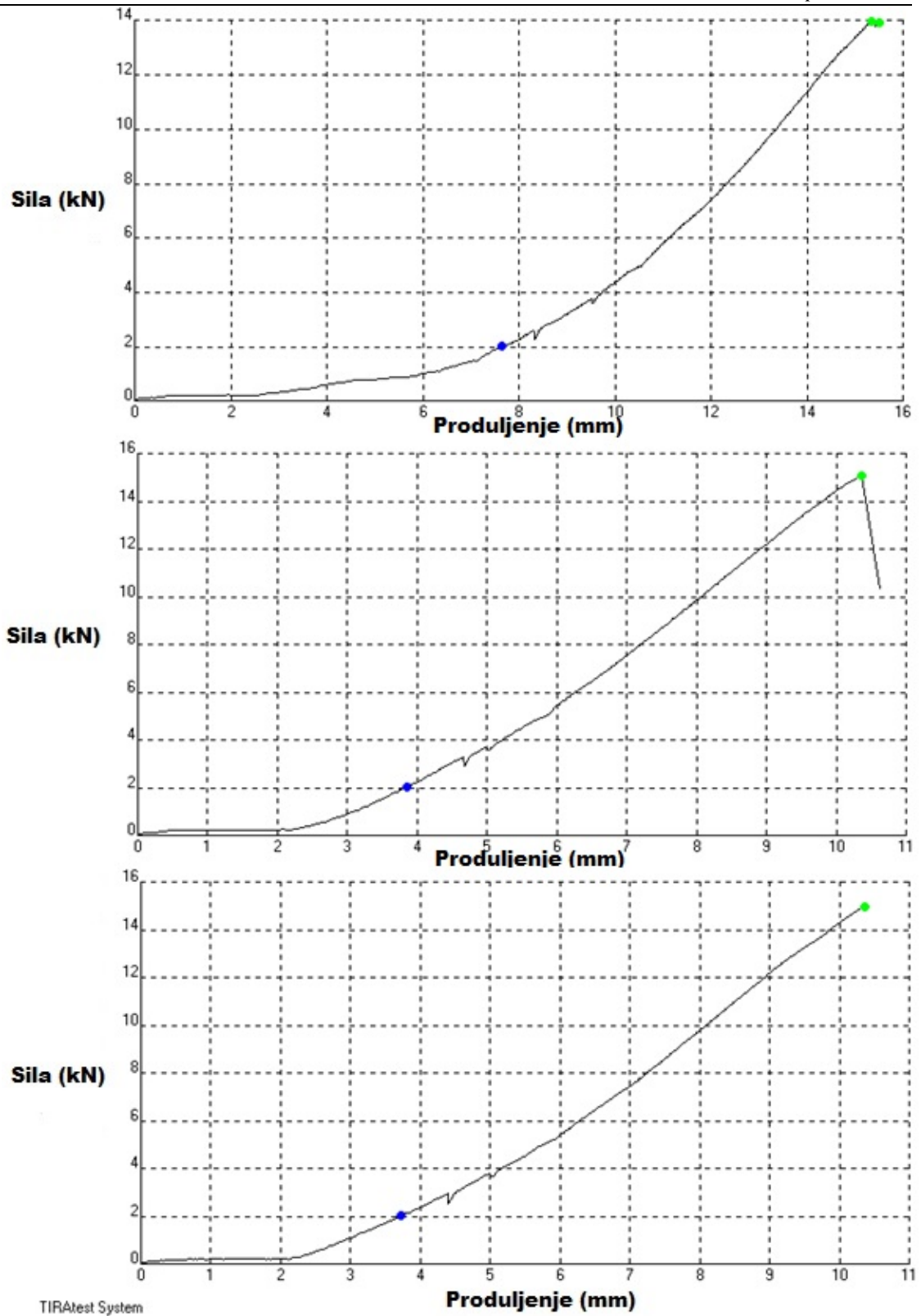
### **4.1. Rezultati statičkog vlačnog pokusa**

Rezultati statičkog vlačnog pokusa bilježeni su pomoću TIRATest programskog paketa i prikazani su na slikama 12 do 16 . Slike prikazuju dijagram ovisnosti sile o produljenju za svaki ispitni uzorak. Dobiveni dijagrami služe za određivanje maksimalne sile za lom epruvete  $F_{\text{maks}}$ .

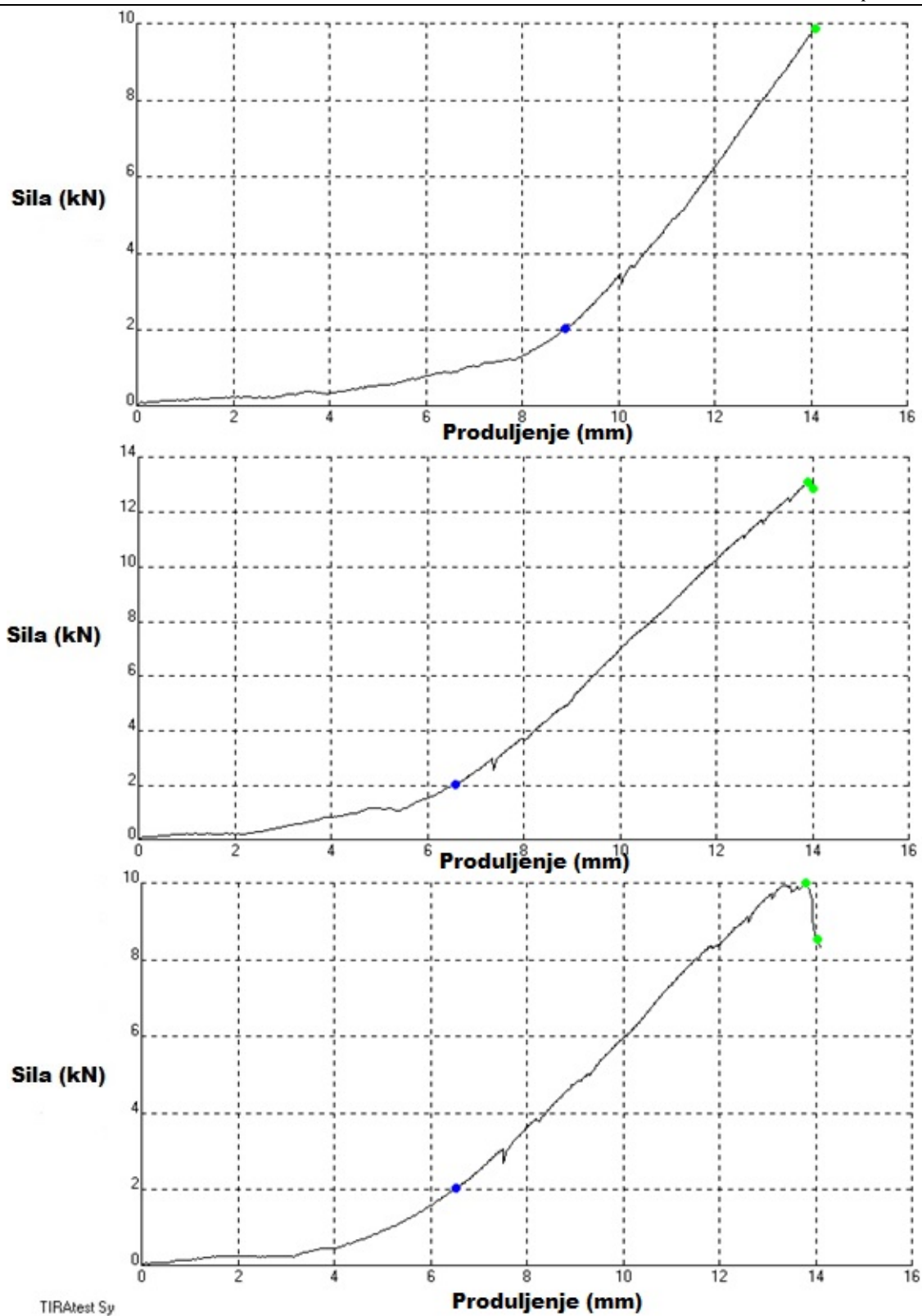


Slika 12. Dijagram sila-produljenje za kompozitne uzorke E/9S

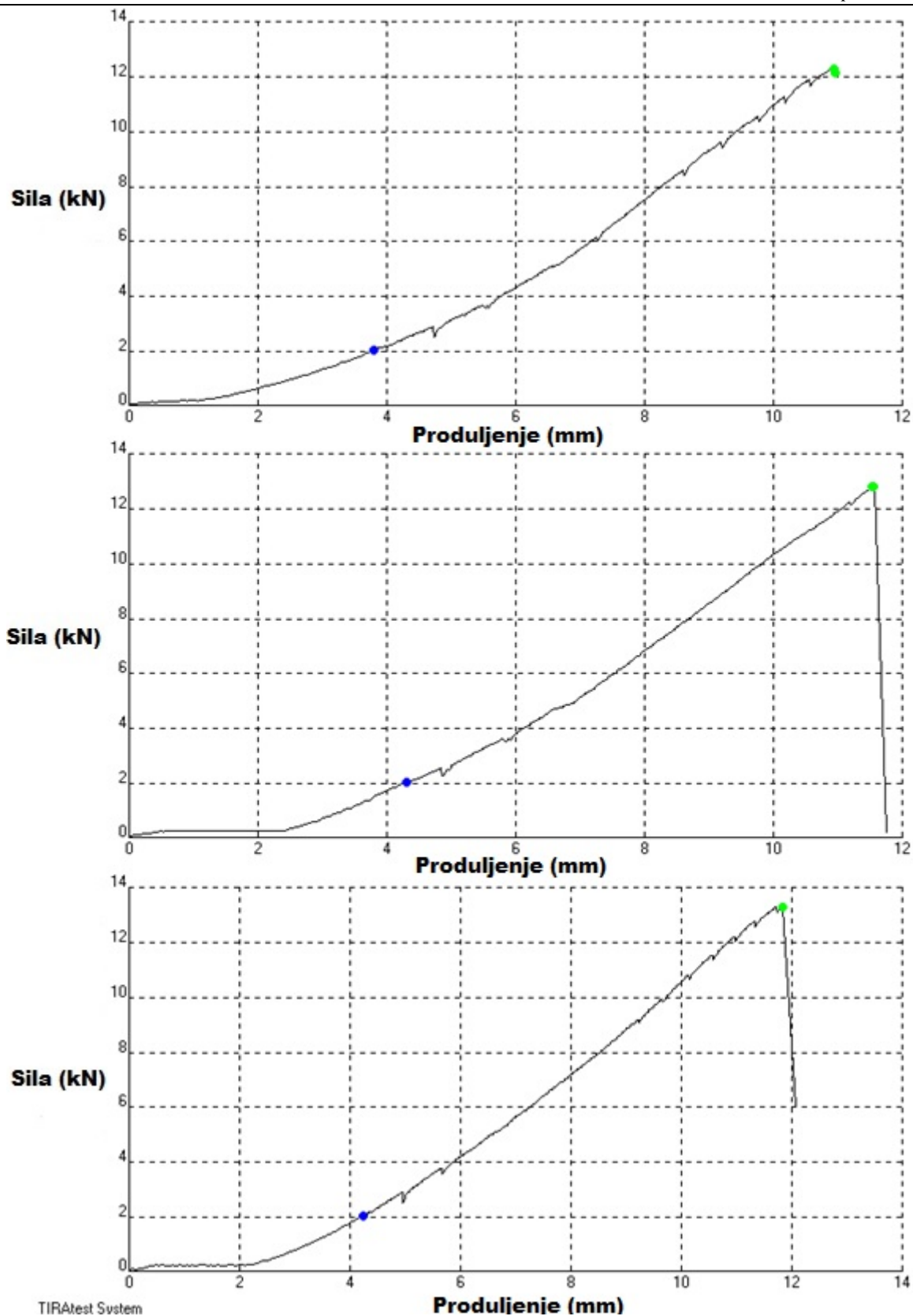




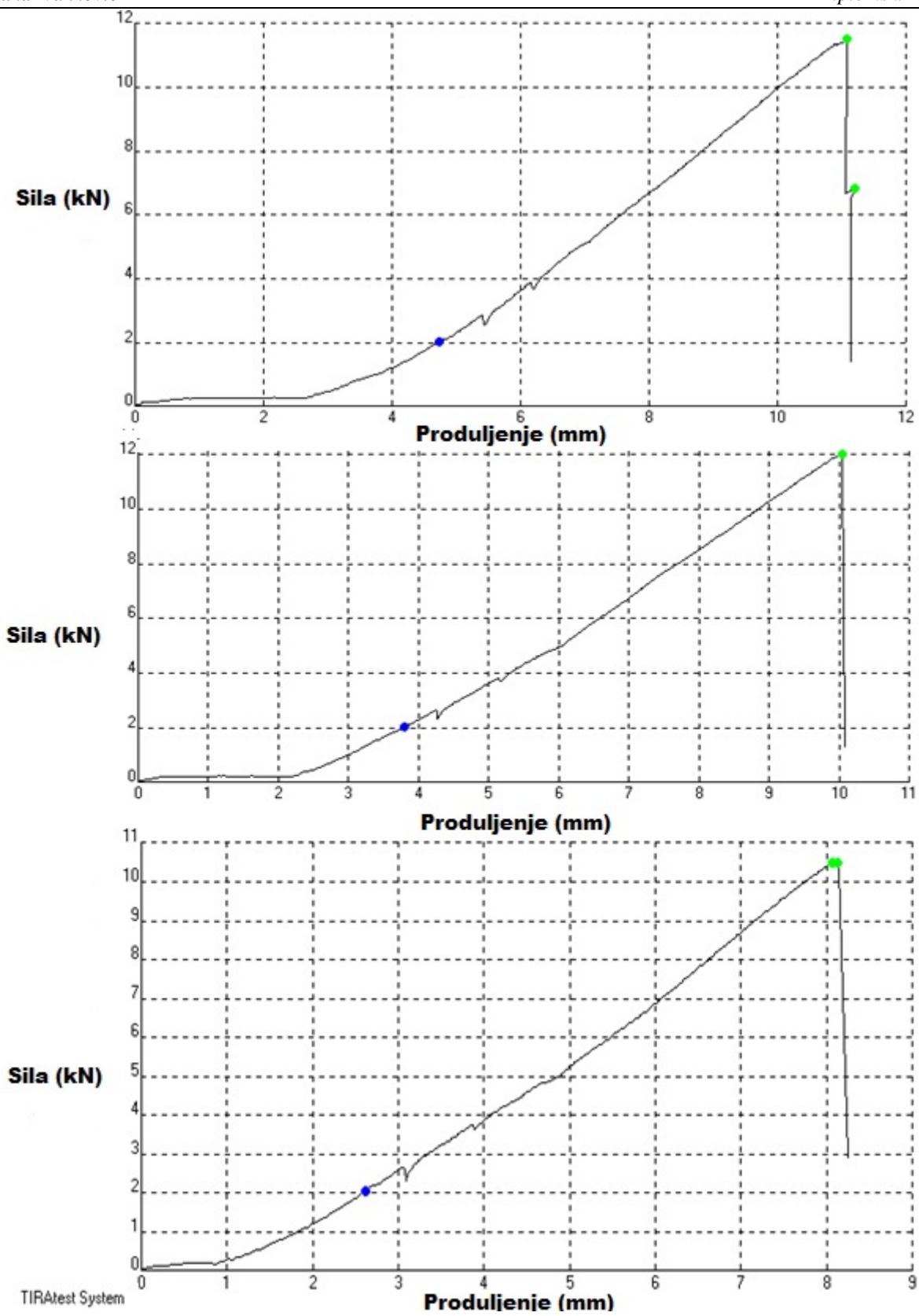
Slika 13. Dijagram sila-produljenje za kompozitne uzorke E/3S 3SI 3S



Slika 14. Dijagram sila-produljenje za kompozitne uzorke E/3S 3AI 3S



Slika 15. Dijagram sila-produljenje za kompozitne uzorke E/3S 3BI 3S



Slika 16. Dijagram sila-produljenje za kompozitne uzorke E/3S 3DI 3S

Na temelju očitane maksimalne sile za lom epruvete  $F_{\max}$  i dimenzija epruvete izračunata je vlačna čvrstoća pojedine epruvete  $R_m$  prema izrazu (2):

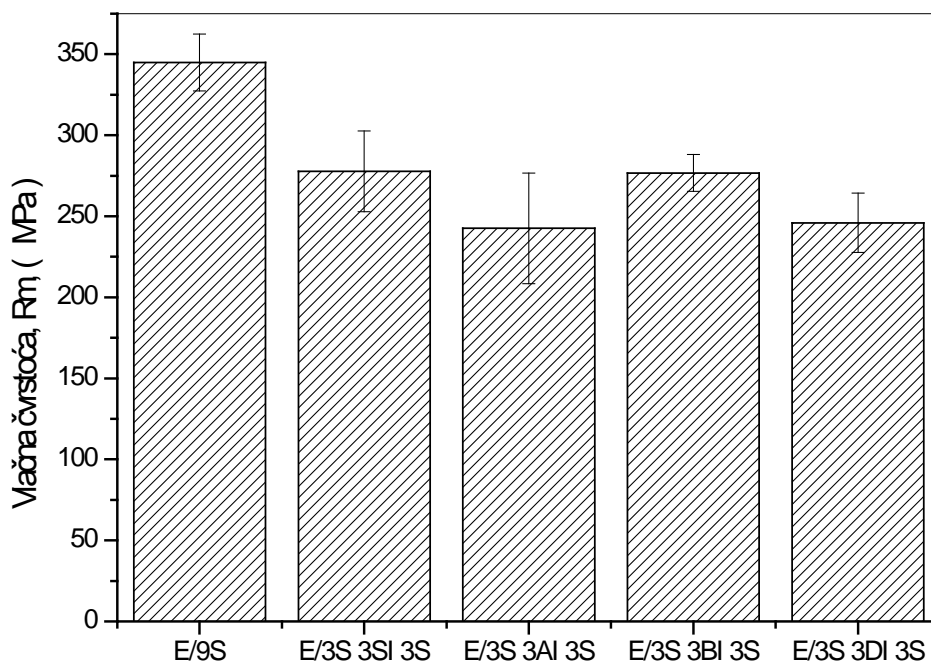
$$R_m = \frac{F_{\max}}{b \cdot h} \quad (1)$$

U Tablici 5 dane su i srednje vrijednosti dobivenih veličina,  $\bar{x}$ , te pripadajuće standardne devijacije,  $\sigma_x$ .

**Tablica 5. Rezultati statičkog vlačnog pokusa**

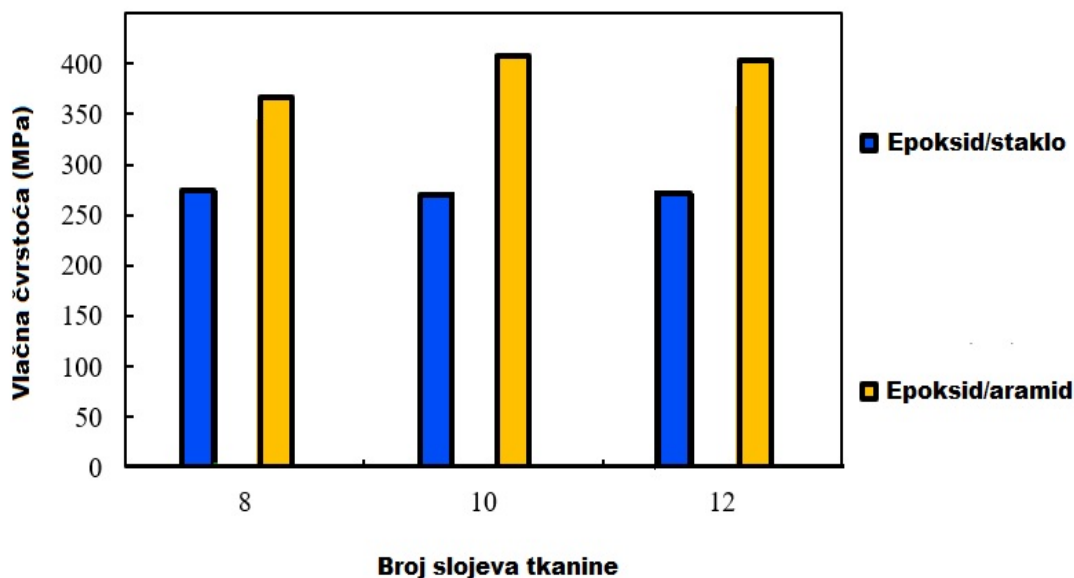
Broj epruvete	KOMPOZIT									
	E/9S		E/3S 3SI 3S		E/3S 3AI 3S		E/3S 3BI 3S		E/3S 3DI 3S	
	Fmax (N)	Rm (MPa)	Fmax (N)	Rm (MPa)	Fmax, (N)	Rm (MPa)	Fmax, (N)	Rm (MPa)	Fmax, (N)	Rm (MPa)
1	13830	330,3	13900	249,8	9880	229,0	12280	265,8	11490	260,2
2	17100	364,3	15100	297,7	13070	281,4	12780	288,5	12000	252,4
3	16340	340,0	14970	285,6	9990	217,2	13300	275,9	10480	225,4
$\bar{x}$	15757	344,9	14657	277,7	10980	242,5	12787	276,7	11323	246,0
$\sigma_x$	1711	17,5	658	24,9	1811	34,2	510	11,4	774	18,2

Vrijednosti vlačne čvrstoće s pripadajućim standardnim odstupanjem istraživanih kompozitnih materijala uspoređene su na slici 17.



**Slika 17. Srednje vrijednosti vlačne čvrstoće i pripadajuće standardne devijacije istraživanih kompozitnih materijala**

Kompozitni materijal E/9S koji sadrži 9 slojeva tkanina staklenih vlakana (koje nisu impregnirane STF-om) u epoksidnoj matrici pokazuje najvišu vrijednost vlačne čvrstoće ( $344,9 \pm 17,5$  MPa). Kompozit E/3S 3SI 3S koji sadrži 3 sloja tkanina impregniranih STF-om i 6 slojeva neimpregniranih tkanina staklenih vlakana pokazuje vrijednost vlačne čvrstoće  $277,7 \pm 24,9$  MPa, usporedivu s literaturnim vrijednostima za kompozite na temelju epoksida i 8/10/12 slojeva tkanina staklenih vlakana (slika 18, [59]).



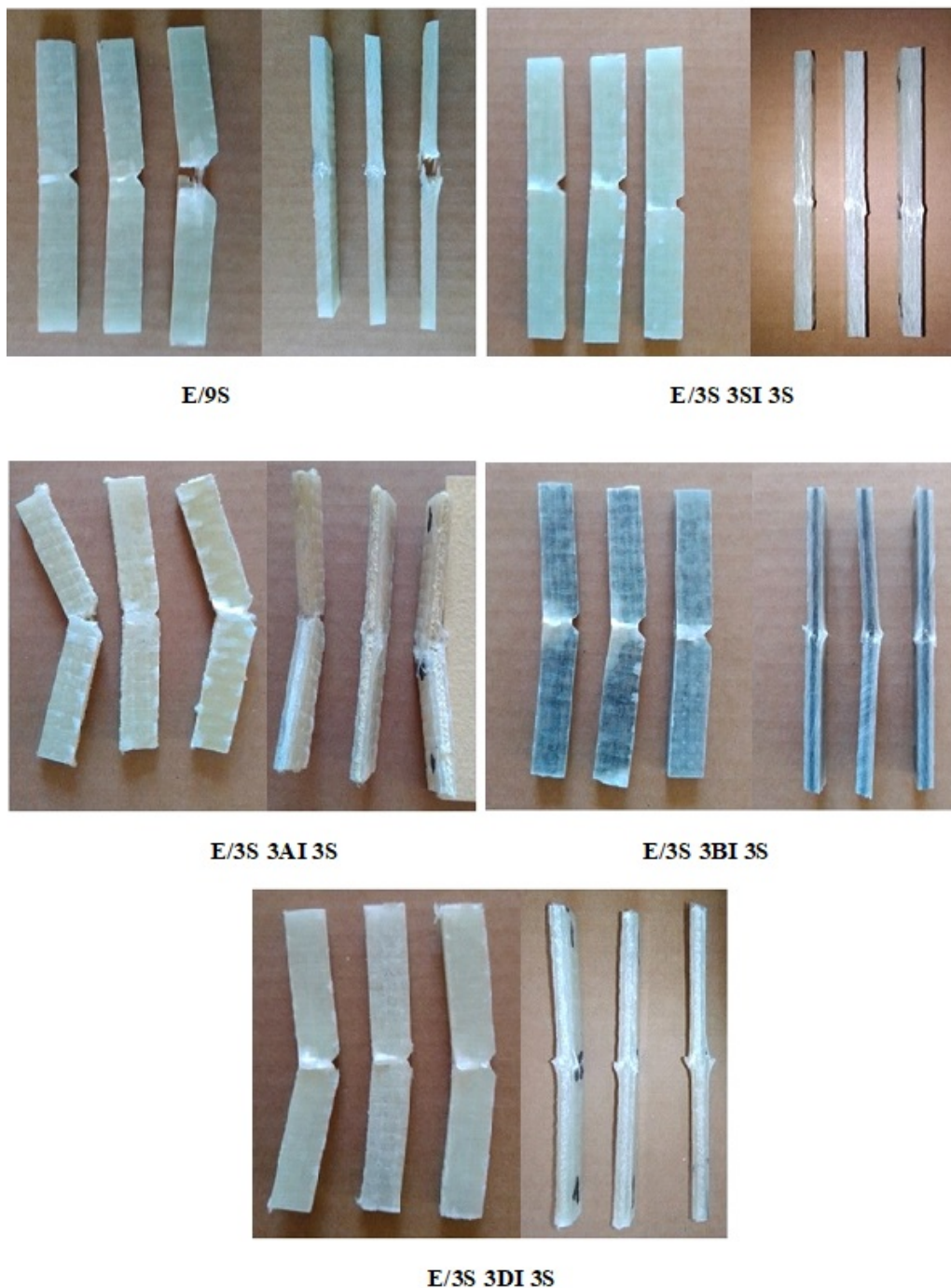
Slika 18. Literaturne vrijednosti vlačne čvrstoće kompozitnih materijala [59]

Bazalna vlakna kemijski su slična staklenim vlaknima što rezultira sličnim vrijednostima vlačne čvrstoće kompozita E/3S 3BI 3S ( $276,7 \pm 11,4$  MPa) i kompozita E/3S 3SI 3S ( $277,7 \pm 24,9$  MPa). U literaturi [60], za kompozite na temelju 10 slojeva bazaltnih tkanina u epoksidnoj matrici navedena je vrijednost vlačne čvrstoće kompozita od 307 MPa. Kompoziti koji sadrže 3 sloja tkanina na temelju organskih vlakana (aramid, UHMWPE) impregniranih STF-om i 6 slojeva neimpregniranih tkanina staklenih vlakana pokazuju najmanje i međusobno usporedive vrijednosti vlačne čvrstoće: E/3S 3AI 3S ( $242,5 \pm 34,2$  MPa); E/3S 3DI 3S ( $245,4 \pm 18,2$  MPa).



## 4.2. Rezultati ispitivanja udarnog rada loma

Izgled epruveta nakon ispitivanja udarnog rada loma prikazuje slika 19.



Slika 19. Fotografije epruveta nakon ispitivanja udarnog rada loma

Kod jednog uzorka kompozitnog materijala E/9S došlo je do potpunog loma materijala, a kod ostala dva vide se mala ispupčenja u području udara odnosno delaminacija (raslojavanje) u

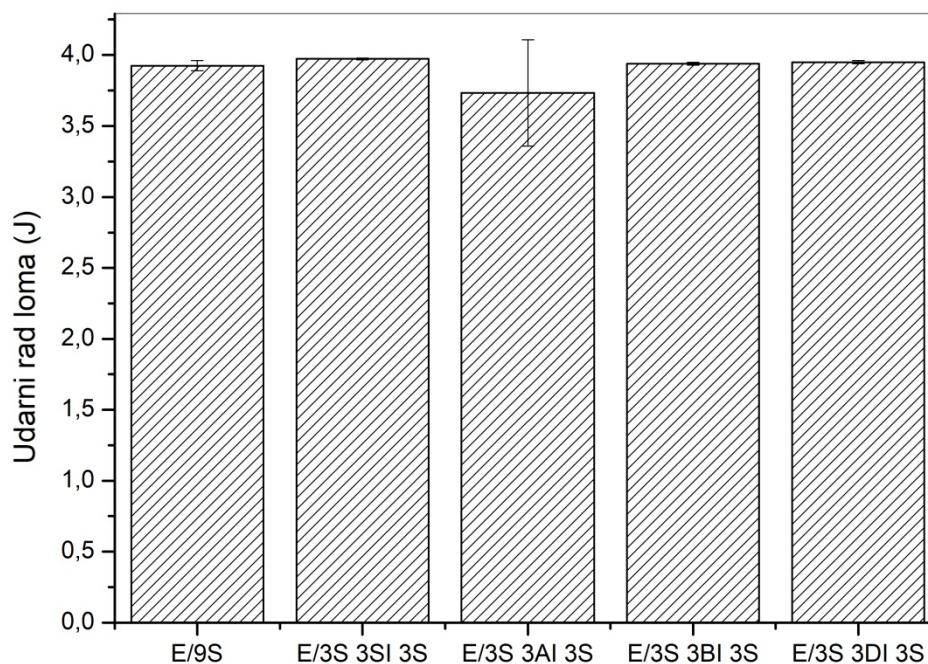


vanjskim slojevima materijala. Kod svih uzoraka kompozitnog materijala E/3S 3SI 3S također su vidljiva ispupčenja u području udara i delaminacija u vanjskim slojevima materijala, bez loma matrice ili vlakana. Raslojavanje je najizraženije u neposrednoj blizini mjesta udara i postepeno se smanjuje prema zarezu na epruveti. Kod kompozitnog materijala E/3S 3AI 3S jasno je vidljiv unutarnji sloj sastavljen od aramidnih tkanina impregniranih STF-om, između vanjskih slojeva epoksida i tkanina na temelju staklenih vlakana koja nisu impregnirana STF-om. Izgled unutarnjeg sloja indicira na lošu impregnaciju aramidnih tkanina epoksidnom smolom. Osim ispupčenja i delaminacije prilikom ispitivanja dva uzorka E/3S 3AI 3S došlo je do djelomičnog loma materijala (epoksidne matrice i ojačala). Kod kompozitnih materijala E/3S 3BI 3S i E/3S 3DI 3S također je vidljivi unutarnji sloj sastavljen od bazaltnih odnosno UHMWPE tkanina impregniranih STF-om. Uslijed udara i kod ovih je materijala došlo do ispupčenja i delaminacije te napuknuća u vanjskim slojevima kompozita. Rezultati ispitivanja udarnog rada loma, srednje vrijednosti i pripadajuće standardne devijacije dani su u Tablici 6.

**Tablica 6. Rezultati ispitivanja udarnog rada loma**

Broj epruvete	KOMPOZIT				
	E/9S	E/3S 3SI 3S	E/3S 3AI 3S	E/3S 3BI 3S	E/3S 3DI 3S
	Udarni rad loma (J)	Udarni rad loma (J)	Udarni rad loma (J)	Udarni rad loma (J)	Udarni rad loma (J)
1	3,90	3,97	3,95	3,93	3,96
2	3,95	3,98	3,95	3,95	3,95
3	3,92	3,97	3,30	3,94	3,94
$\bar{x}$	3,92	3,97	3,73	3,94	3,95
$\sigma_x$	0,025	0,006	0,375	0,01	0,01

Vrijednosti udarnog rada loma istraživanih kompozitnih materijala uspoređene su na slici 20.



**Slika 19. Usporedba srednjih vrijednosti s pripadajućim standardnim devijacijama udarnog rada loma istraživanih kompozitnih materijala**

Uz iznimku kompozita E/3S 3AI 3S, svi kompoziti koji sadrže tkanine impregnirane sa STF-om posjeduju zanemarivo višu prosječnu vrijednost udarnog loma u usporedbi s kompozitom E/9S. Potrebna su daljnja istraživanja koja bi potvrdila potencijal istraživanih kompozita za balističku zaštitu (npr. vozila za prijevoz dragocjenosti, prostora kao što su banke i sl.).

## 5. ZAKLJUČAK

Polimerni kompozitni materijali ojačani tkaninama impregniranim s nenewtonskim tekućinama izazvali su veliku pozornost znanstvenika fokusiranih na razvoj pametnih materijala i struktura za zaštitne primjene.

U ovom radu tkanine načinjene od staklenih, aramidnih, bazaltnih i UHMWPE vlakana impregnirane su nenewtonskom tekućinom koja posjeduje posmično zgušnjavanje (STF na temelju silicijevog dioksida i polietilen glikola) i korištene kao ojačalo u polimernim (epoksidnim) kompozitima. Mehanička svojstva kompozitnih materijala dobivena su pomoću statički vlačnog ispitivanja i ispitivanja udarnog rada loma.

Kompoziti ojačani s tkaninama impregniranim sa STF-om posjeduju manju prosječnu vrijednost vlačne čvrstoće (između  $242,5 \pm 34,2$  i  $277,7 \pm 24,9$  MPa ) u usporedbi s kompozitom E/9S ( $344,9 \pm 17,5$  MPa), ojačanim s neimpregniranim tkaninama od staklenih vlakana.

Uz iznimku kompozita E/3S 3AI 3S, svi kompoziti koji sadrže tkanine impregnirane sa STF-om posjeduju višu prosječnu vrijednost udarnog loma u usporedbi s kompozitom E/9S.

Potrebna su daljnja istraživanja koja bi potvrdila potencijal istraživanih kompozita za zaštitu od kinetičkih penetratora ( npr. kao balistički štiti za laka oklopna vozila, patrolne brodove i helikoptere, u vozilima za prijevoz dragocjenosti, u prostorima kao što su banke).

**LITERATURA**

- [1] Czech K., Oliwa R., Krajewski D., Bulanda K., Oleksy M., Budzik G., Mazurkow A. Hybrid Polymer Composites Used in the Arms Industry: A Review. *Materials*, 2021, 14(11), 3047. doi: 10.3390/ma14113047.
- [2] Fang H., Bai Y., Liu W., Qi Y., Wang J. Connections and Structural Applications of Fibre Reinforced Polymer Composites for Civil Infrastructure in Aggressive Environments. *Compos. Part. B Eng.*, 2019, 164:129–143. doi:10.1016/j.compositesb.2018.11.047
- [3]. Volpe V., Lanzillo S., Affinita G., Villacci B., Macchiarolo I., Pantani R. Lightweight High-Performance Polymer Composite for Automotive Applications, *Polymers*, 2019, 11, 326. doi:10.3390/polym11020326
- [4] Zimmermann N., Wang P.H. A Review of Failure Modes and Fracture Analysis of Aircraft Composite Materials., *Eng. Fail. Anal.*, 2020, 115, 104692. doi:10.1016/j.engfailanal.2020.104692
- [5] Malvern Instruments White Paper-An Introduction to Rheology, <https://cdn.technologynetworks.com/TN/Resources/PDF/WP160620BasicIntroRheology.pdf>
- [6] Lee Y.S., Wetzel E.D., Wagner N.J., The Ballistic Impact Characteristics of Kevlar® Woven Fabrics Impregnated with a Colloidal Shear Thickening Fluid, *J. Mater. Sci.*, 2003, 38: 2825-2833.
- [7] Liu K., Cheng C.-F., Zhou L., Zou F., Liang W., Wang M. Zhu Y., A shear thickening fluid based impact resistant electrolyte for safe Li-ion batteries. *J. Power Sources*, 2019, 423: 297–304.
- [8] Liu M., Zhang S., Liu S., Cao, S., Wang S., Bai L., Sang M., Xuan S., Jiang W., Gong X., CNT/STF/Kevlar-based wearable electronic textile with excellent anti-impact and sensing performance. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 2019, 126, 114797.
- [9] Wang S., Liu S., Zhou J., Li F., Li J., Cao X., Li Z., Zhang J., Li B., Wang Y, Gong X. Advanced triboelectric nanogenerator with multi-mode energy harvesting and anti-impact properties for smart glove and wearable e-textile, *Nano Energy*, 2020, 78, 105291.
- [10] Liu H., Fu K., Zhu H., Yang B. The acoustic property and impact behaviour of 3D printed structures filled with shear thickening fluids, *Smart Mater. Struct.*, 2021, 31, 015026.

- [11] Liu H., Zhu H., Fu K., Sun G., Chen Y., Yang B., Li Y. High-impact resistant hybrid sandwich panel filled with shear thickening fluid, *Compos. Struct.*, 2022, 284, 115208.
- [12] Gurgen S., Kushan M., Li, W. (2017). Shear thickening fluids in protective applications: A review. *Progress in Polymer Science*, 2017,75, 48-72.
- [13] Jiang W., Xuan S., Gong X., The role of shear in the transition from continuous shear thickening to discontinuous shear thickening, *Appl. Phys. Lett.*, 2015, 106 (15), 151902.
- [14] Ozturk D., Morgan M.L., Sandnes B., Flow-to-fracture transition and pattern formation in a discontinuous shear thickening fluid, *Commun. Phys.*,2020, 3 (1),1–9.
- [15] Sedes O., Singh A., Morris J.F., Fluctuations at the onset of discontinuous shear thickening in a suspension, *J. Rheol.*, 2020, 64 (2), 309–319.
- [16] Mari R., Seto R., Morris J.F., Denn M.M. Shear thickening, frictionless and frictional rheologies in non-Brownian suspensions. *J. Rheol.* 2014, 58, 1693–1724.
- [17] Mawkhlieng U., Majumdar A., Laha A. A Review of Fibrous Materials for Soft Body Armour Applications, *RSC Adv.*, 2020,10:1066–1086. doi: 10.1039/C9RA06447H.
- [18] Bajya M., Majumdar A., Butola B.S., Verma S.K., Bhattacharjee D. Design Strategy for Optimising Weight and Ballistic Performance of Soft Body Armour Reinforced with Shear Thickening Fluid, *Compos. Part. B Eng.*, 2020,183,107721. doi:10.1016/j.compositesb.2019.107721.
- [19] Subramaniam C.G., Annamalai V. Recent Advancements in Shear Thickening Fluid A applications—A Review. *J. Chem. Pharm. Sci.*, 2017, 7, 84–92.
- [20] Afeshejani S.H.A., Sabet S.A.R., Zeynali M.E., Atai M. Energy Absorption in a Shear-Thickening Fluid. *J. Mater. Eng. Perform.*, 2014, 23, 4289–4297.
- [21] Hoffman R.L. Discontinuous and Dilatant Viscosity Behavior in Concentrated Suspensions. I. Observation of a Flow Instability, *Trans. Soc. Rheol.*, 1972, 16, 155–173.
- [22] Brady J.F., Bossis G., The rheology of concentrated suspensions of spheres in simple shear flow by numerical simulation. *J. Fluid Mech.*, 2006, 155, 105–129.
- [23] Butera R.J., Wolfe M.S., Bender J., Wagner N.J. Formation of a Highly Ordered Colloidal Microstructure upon Flow Cessation from High Shear Rates. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, 77, 2117–2120.
- [24] Bossis G., Brady J.F. The rheology of Brownian suspensions. *J. Chem. Phys.*, 1989, 91, 1866–1874.
- [25] Ding J., Tracey P., Li W., Peng G., Whitten P. G., Wallace G. G. (2013). Review on shear thickening fluids and applications. *Textiles and Light Industrial Science and Technology*, 2013, 2 (4), 161-173.

- [26] Sun L., Wei M., Zhu J., Low velocity impact performance of fiber-reinforced polymer impregnated with shear thickening fluid, *Polym. Test.*, 2021, 96, 107095.
- [27] Cheng X., McCoy J.H., Israelachvili, J.N., Cohen I. Imaging the microscopic structure of shear thinning and thickening colloidal suspensions. *Science*, 2011, 333, 1276–1279.
- [28] Waitukaitis S.R., Jaeger H.M. Impact-activated solidification of dense suspensions via dynamic jamming fronts. *Nature*, 2012, 487, 205–209.
- [29] Srivastava A., Majumdar A., Butola B. Improving the impact resistance of textile structures by using shear thickening fluids: A review. *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.*, 2012, 37, 115–129.
- [30] Kim Y., Park Y., Cha J., Ankem V.A., Kim C.G. Behavior of Shear Thickening Fluid (STF) impregnated fabric composite rear wall under hypervelocity impact. *Compos. Struct.*, 2018, 204, 52–62.
- [31]. Ghosh A., Majumdar A., Butola B.S. Rheometry of novel shear thickening fluid and its application for improving the impact energy absorption of p-aramid fabric. *Thin-Walled Struct.*, 2020, 155, 106954.
- [32] Kim Y., Sathish Kumar S.K., Park Y., Kwon H., Kim C.G. High-velocity impact onto a high-frictional fabric treated with adhesive spray coating and shear thickening fluid impregnation. *Compos. B Eng.*, 2020, 185, 107742.
- [33] Ribeiro M.P., da Silveira P.H.P.M., de Oliveira Braga F. Monteiro S.N. Fabric Impregnation with Shear Thickening Fluid for Ballistic Armor Polymer Composites: An Updated Overview. *Polymers*, 2022, 14, 4357. <https://doi.org/10.3390/polym14204357>
- [34] Levinsky A.A., Sapozhnikov S.B., Grass T.S. Development of knife- and bullet-impact-resistant Composite Structures. *Mech. Compos. Mater.*, 2012, 48, 405–414.
- [35] Grineviciute D., Abraitiene A., Sankauskaite A., Tumeiene D.M., Lenkauskaite L., Barauskas R. Influence of Chemical Surface Modification of Woven Fabrics on Ballistic and Stab Protection of Multilayer Packets., *Mater. Sci. Medziagotyra*, 2014, 20, 193–197.
- [36] Haro E.E., Szpunar J.A., Odeshi A.G. Ballistic impact response of laminated hybrid materials made of 5086-H32 aluminum alloy, epoxy and Kevlar® fabrics impregnated with shear thickening fluid. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 2016, 87, 54–65.
- [37] Olszewska K., Zielinska D., Struszczyk M.H., Wierzbicki L., Leonowicz M.K. Thermal stability of the elastomeric anti-trauma pad. *Pol. J. Chem. Technol.*, 2017, 19, 93–100.

- [38] Eddine Tria D., Hemmouche L., Allal A., Benouali A. Experimental and numerical analysis of high and low velocity impacts against neat and shear thickening fluid (STF) impregnated weave fabrics., *EPJ Web Conf.*, 2018,183, 1044.
- [39] Cho H., Lee J., Hong S., Kim S. Bulletproof Performance of Composite Plate Fabricated Using Shear Thickening Fluid and Natural Fiber Paper., *Appl. Sci.*, 2019, 10, 88.
- [40] Yeh S.K., Lin J.J., Zhuang H.Y., Chen Y.C., Chang H.C., Zheng J.Y., Yang L.Y., Lee K.C., Chen Y.L., Rwei S.P. Light shear thickening fluid (STF)/Kevlar composites with improved ballistic impact strength.,*J. Polym. Res.*, 2019, 26, 1–13.
- [41] Yeh S., Zhuang H., Chen Y., Tseng P., Zheng J., Yang L., Lee K., Chen Y. High-velocity impact performance of shear-thickening fluid/kevlar composites made by the padding process., *Polym. Compos.*, 2019, 40, 3040–3049.
- [42] Liu L., Cai M., Liu X., Zhao Z., Chen W. Ballistic impact performance of multi-phase STF-impregnated Kevlar fabrics in aero-engine containment. *Thin-Walled Struct.*, 2020, 157, 107103.
- [43] Chang C.P., Shih C.H., You J.L., Youh M.J., Liu Y.M., Ger M.D. Preparation and Ballistic Performance of a Multi-Layer Armor System Composed of Kevlar/Polyurea Composites and Shear Thickening Fluid (STF)-Filled Paper Honeycomb Panels., *Polymers*, 2021, 13, 3080.
- [44] Jeddi M., Yazdani M., Hasan-nezhad H. Energy absorption characteristics of aluminum sandwich panels with Shear Thickening Fluid (STF) filled 3D fabric cores under dynamic loading conditions. *Thin-Walled Struct.*, 2021, 168, 108254.
- [45] Katiyar A., Nandi T., Prasad N.E. Impact behavior of aminosilane functionalized nanosilica based shear thickening fluid impregnated Kevlar fabrics. *J. Appl. Polym. Sci.*, 2021, 138, 50862.
- [46] Zhang J., Wang Y., Zhou J., Zhao C., Wu Y., Liu S., Gong X. Intralayer interfacial sliding effect on the anti-impact performance of STF/Kevlar composite fabric., *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 2021, 145, 106401.
- [47] Bablu M.A., Manimala J.M. Mechanisms of ballistic performance enhancement in silica nanoparticle-treated kevlar fabric.,*J. Compos. Mater.*, 2022, 56, 2253–2266.
- [48] Hasan-nezhad H., Yazdani M., Jeddi M. High- and low-velocity impact experiments on treated STF/3D glass fabrics. *Thin-Walled Struct.*, 2022, 171, 108720.

- [49] Kubit A., Trzepieciński T., Kiciński R., Jurczak K. Three-Dimensional Smooth Particle Hydrodynamics Modeling and Experimental Analysis of the Ballistic Performance of Steel-Based FML Targets., *Materials*, 2022, 15, 3711.
- [50] Mahesh V., Harursampath D., Mahesh V. An experimental study on ballistic impact response of jute reinforced polyethylene glycol and nano silica based shear thickening fluid composite., *Def. Technol.*, 2022, 18, 401–409.
- [51] Mishra V.D., Mishra A., Singh A., Verma L., Rajesh G. Ballistic impact performance of UHMWP fabric impregnated with shear thickening fluid nanocomposite. *Compos. Struct.*, 2022, 281, 114991.
- [52] Xu Y., Zhang H., Huang G. Ballistic performance of B4C/STF/Twaron composite fabric. *Compos. Struct.*, 2022, 279, 114754.
- [53] Zhihao X., Xiaodi H., Lulu L., Wei C., Zhenhua Z., Gang L. Influences of a wide service-environment temperature range on the ballistic performance of STF-impregnated Kevlar., *Compos. Struct.*, 2022, 287, 115330.
- [54] Zhang X., Zhang Q., Yan R., Qin Z. Fluid-structure interaction simulation and evaluation of ballistic impact of STF impregnated UHMWPE fiber composites., *Polym. Test.*, 2022, 115, 107757.
- [55] Bajya M., Majumdar A., Butola B.S., Jasra R.V. Efficacy of various structural forms of disentangled polyethylene laminates against low velocity impact. *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, 2023, 36 (10), 4189-4210.
- [56] Srivastava A., Majumdar A., Butola B.S. Improving the impact resistance of textile structures by using shear thickening fluids: a review. *Cri. Rev. Solid State Mater. Sci.*, 2012, 37, 115–129.
- [57] Chatterjee V.A., Verma S.K., Bhattacharjee D., Biswas I., Neogi S. Enhancement of energy absorption by incorporation of shear thickening fluids in 3D-mat sandwich composite panels upon ballistic impact. *Compos. Struct.*, 2019, 225, 111148. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111148>
- [58] Khodadadi A., Liaghat G., Vahid S., Sabet A.R., Hadavinia H. Ballistic performance of Kevlar fabric impregnated with nanosilica/PEG shear thickening fluid. *Compos. B Eng.*, 2019, 162, 643–652.
- [59] P Skalková P., V Krmelová V., J Krmela J, D Ondrušova D. , A Crkoň A., and E Benčíková E. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2021, 1199, 012030.



---

[60] Matykiewicz D., Salasinska K., Barczewski M. The effect of poly(vinyl chloride powder addition on the Thermomechanical properties of epoxy composites reinforced with basalt fiber. *Materials*, 2020, 13 (16), 3611.