

# Primjena kompozitnih materijala za podnicu gospodarskog vozila

---

Tujmer, Mislav

Master's thesis / Diplomski rad

2021

*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:235:653081>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-08-07**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mislav Tujmer

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor: doc. dr. sc. Petar Ilinčić

Mislav Tujmer  
0035183157

Zagreb, 2021



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:

Procesno-energetski, konstrukcijski, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodstrojarski

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 21 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 21 -	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Mislav Tujmer** JMBAG: 0035183157

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Primjena kompozitnih materijala za podnicu gospodarskog vozila**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Application of composite materials for commercial vehicle flooring**

Opis zadatka:

Kompozitni materijali (kompoziti) proizvedeni su spajanjem dvaju ili više materijala različitih svojstava s ciljem dobivanja materijala takvih svojstava kakva ne posjeduje niti jedan od korištenih materijala sam za sebe. Zbog takvih karakteristika, kompozitni materijali se sve više primjenjuju u transportnoj industriji za izradu nosivih dijelova vozila, gdje se posebno ističu polimerni kompoziti primarno zbog odličnog omjera čvrstoće i mase.

U sklopu diplomskog rada potrebno je napraviti pregled polimernih kompozitnih materijala koji se primjenjuju za izradu nosivih dijelova gospodarskih vozila (podnica vozila, nosiva rešetka) te trendove na tom području. Uz pregled postojećih rješenja potrebno je analizirati i postupke izrade te zahtjeve koji se postavljaju na materijale ovisno o njihovoj primjeni.

Temeljem analize postojećih rješenja i primijenjenih kompozitnih materijala, predložiti rješenje za izradu podnice za multifunkcionalno niskopodno električno vozilo. Za predloženo rješenje potrebno je, u eksperimentalnom dijelu rada, izraditi odgovarajuće ispitne uzorke i ispitati mehanička svojstva izrađenih dijelova (uzoraka). Iz rezultata ispitivanja, ocijeniti može li se predloženo rješenje primijeniti za izradu podnice vozila.

Podatke o mjerama vozila te uzoraka za ispitivanje dogovoriti s mentorom.

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

Zadatak zadan:

6. svibnja 2021.

Datum predaje rada:

8. srpnja 2021.

Predviđeni datumi obrane:

12. – 16. srpnja 2021.

Zadatak zadao:

  
Doc.dr.sc. Petar Ilinčić

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

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

Mislav Tujmer

Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Petru Ilinčiću i izv.prof. dr. sc. Ani Pilipović na strpljenju, savjetima i trudu zbog kojeg sam stekao vrijedno znanje. Motivacija koju ste svojom energijom potaknuli olakšala mi je izradu rada.

Zahvaljujem se doc. dr. sc. Zoranu Domitranu te tvrtci Domitran Novitas na iskustvenim savjetima i pomoći koja je bila neophodna za izradu ovog rada. Želim se zahvaliti dr. sc. Nenadu Drvaru i tvrtci Topomatika na spremnosti na pomoć i stručnim savjetima. Hvala g. Siniši Markoviću i tvrtci ADR-Sistemi d.o.o. na angažmanu i provedenim ispitivanjima.

Iznimno sam zahvalan mojim prijateljima Petru i Corrini Filipović te Vedranu Palfiju na razumijevanju i podršci.

Veliko hvala mojoj obitelji, mojim roditeljima, na beskrajnoj ljubavi, strpljenju i vjeri u mene.

Mislav Tujmer

# SADRŽAJ

POPIS SLIKA.....	I
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA.....	V
POPIS KRATICA.....	VII
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY.....	IX
1. UVOD.....	1
1.1. Povijest kompozitnog materijala.....	1
2. KOMPOZITNI MATERIJALI.....	3
2.1. Podjela prema materijalu matrice.....	6
2.1.1. Kompoziti s metalnom matricom.....	7
2.1.2. Kompoziti s keramičkom matricom.....	7
2.1.3. Kompoziti s polimernom matricom.....	8
2.2. Podjela prema vrsti ojačavala.....	11
2.2.1. Vlaknima ojačani kompoziti.....	11
2.2.2. Kompoziti ojačani česticama.....	16
3. Primjena kompozitnih materijala u transportnim vozilima.....	17
3.1. Kompozitni materijali u strukturnim dijelovima vozila.....	17
3.2. Primjena kompozitnih materijala u ostalim elementima vozila.....	24
4. POSTUPCI PRERADE KOMPOZITNIH MATERIJALA.....	25
4.1. Postupak ručnog dodirnog laminiranja (eng. <i>Lay up moulding</i> ).....	25
4.2. Dodirni postupak sa štrcanjem (eng. <i>Spray up moulding</i> ).....	27
4.3. Pultrudiranje (eng. <i>Pultrusion</i> ).....	28
4.4. Namotavanje filameta (eng. <i>Filament winding</i> ).....	30
4.5. Povlačno namotavanje filameta (eng. <i>Pullwinding</i> ).....	32
4.6. Izravno prešanje (eng. <i>Compression moulding</i> ).....	33
4.7. Podtlačno ulijevanje (eng. <i>Resin infusion</i> ).....	34
4.8. Podtlačno oblikovanje vrećom (eng. <i>Vacuum baging</i> ).....	36
4.9. Postupak injekcijskog-posrednog prešanja kapljevite smole s umetnutim trodimenzionalnim ojačavajućim predoblikom (eng. <i>Resin Transfer Moulding</i> ).....	37
5. PODNICA.....	38
6. EKSPERIMENTALNI DIO.....	40

6.1. Izrada profila .....	41
6.2. Proračun troškova.....	47
6.3. Mjerenje profila optičkim mjernim sustavom TRITOP .....	48
6.3.1. Opis ispitivanja profila .....	49
6.3.2. Mjerenje profila.....	50
6.2.3. Rezultati mjerenja profila.....	53
6.4. Ispitivanja mehaničkih svojstava kompozitnih profila.....	56
6.4.1. Ispitivanje žilavosti po Izodu .....	56
6.4.2. Ispitivanje rasteznih svojstva .....	61
6.4.3. Ispitivanje savojnih svojstava.....	68
6.4.5. Rasprava .....	74
7. ZAKLJUČAK.....	75
8. LITERATURA .....	76
PRILOZI.....	78





**POPIS SLIKA**

Slika 2.1. Vrste kompozita: a) česticama ojačani, b) vlaknima ojačani, c) strukturni kompozit [3] .....	3
Slika 2.2. Dijagram naprezanje-istezanje konstituenata i kompozita [4] .....	4
Slika 2.3. Različiti načini rasporeda vlakana a) kontinuirano jednosmjerna vlakna b) slučajno usmjerena diskontinuirana vlakna c) ortogonalno raspoređena vlakna d) višesmjerno usmjerena vlakna [4] .....	11
Slika 2.4 Struk staklenih vlakana [10] .....	12
Slika 2.5. Mat staklenih vlakana proizvođača <i>Hacotech</i> [11] .....	13
Slika 2.6. Prepreg proizvođača <i>Haufler</i> [12] .....	13
Slika 2.7. Tkanina od ugljičnih vlakana .....	15
Slika 2.8. Hibridna tkanina, ugljična i aramidna vlakna [38] .....	15
Slika 3.1. Poluintegrirani dizajn [15] .....	18
Slika 3.2. Integrirani dizajn [15] .....	18
Slika 3.3 Električni autobus proizvođača <i>Yutong</i> s <i>EXEL</i> kompozitnim elementima [17] .....	19
Slika 3.4. <i>Bodywork</i> autobusa <i>EcoRide</i> proizvođača <i>Proterra</i> iz 2005 godine [19] .....	20
Slika 3.5. Završena monocoque samonosiva šasija modela <i>Catalyst</i> od proizvođača <i>Proterra</i> [20] .....	21
Slika 3.6. Proizvodnja gornjeg dijela šasije <i>SCRIMP</i> postupkom [20] .....	21
Slika 3.7. Projekt <i>LITE bus</i> dijelovi i struktura te koncept vozila [22] .....	22
Slika 3.8. Presjek profila upotrebljavanog za dobivanje krutosti konstrukcije u projektu <i>FEUP bus</i> [21] .....	23
Slika 3.9 <i>Scania NXT</i> modularni električni autobus [23] .....	23
Slika 3.10 Poklopac vrata krovnog prostora od dva sloja a) spojenih u cjelinu [24] .....	24
Slika 3.11 Sjedalo gradskog autobusa od kompozita ojačanog E staklenim vlaknima [15] .....	24
Slika 4.1. Postupak dvajanja zraka i viška smole [5] .....	26
Slika 4.2. Umreživanje i vađenje kompozita iz kalupa [5] .....	26
Slika 4.3. Dodirni postupak naštrcavanjem [5] .....	27
Slika 4.4. Shema postupka pultrudiranja [26] .....	29
Slika 4.5. Suvremena linija za pultrudiranje tvrtke <i>EXEL Composites</i> [27] .....	30
Slika 4.6. Shema postupka namotavanja [26] .....	31
Slika 4.7. Načini namotavanja vlakna na jezgru [5] .....	32
Slika 4.8. Princip <i>pullwinding</i> postupka tvrtke <i>EXEL</i> [27] .....	32
Slika 4.9. Postupak izravnog toplog prešanja [28] .....	33

Slika 4.10. BMC sirovac proizvođača <i>HAM Composites</i> [29].....	34
Slika 4.11. SMC sirovac proizvođača <i>HAM Composites</i> [29] .....	34
Slika 4.12. Postupak podtlačnog ulijevanja [5].....	35
Slika 4.13. Podtlačno oblikovanje vrećom [5] .....	36
Slika 4.14. Postupak RTM [26].....	37
Slika 5.1. Rešetkasta konstrukcija suvremenog električnog autobusa .....	38
Slika 5.2 Konceptualno rješenje podnice .....	39
Slika 5.3 Poprečni presjek elementa podnice.....	39
Slika 6.1 Model elementa (profila) podnice.....	40
Slika 6.2 Poprečni presjek elementa podnice.....	40
Slika 6.3 Shema strukture izrađenih profila .....	42
Slika 6.4 Nanošenje i poliranje odvajala.....	43
Slika 6.5 Miješanje smole .....	43
Slika 6.6. Izrada prvog profila: a) slaganje mata u kalup i b) impregnacija smolom .....	44
Slika 6.7. Prerada kompozita: a) istiskivanje zraka, b) vađenje gotovog profila iz kalupa .....	45
Slika 6.8. Impregnacija prvog sloja profila 3 .....	46
Slika 6.9. Ručno laminiranje profila 3: a) nanošenje smole kistom i istiskivanje zraka, b) početak umreživanja .....	46
Slika 6.10. Princip rada mjernog uređaja <i>Tritop</i> [34] .....	48
Slika 6.11. Mjerne točke: a) kodirana, b) nekodirana [32] .....	48
Slika 6.12. Mjerni postav profila 1 u neopterećenom stanju.....	49
Slika 6.13. Kalibracijske snimke tijekom mjerenja profila 2 opterećenog s 20 kg.....	50
Slika 6.14. Profil 1: a) neopterećeno stanje, b) opterećenje od 20 kg.....	51
Slika 6.15. Profil 2: a)opterećenje 40 kg, b) opterećenje 60 kg .....	51
Slika 6.16. Profil 3: a) opterećenje od 80 kg, b) opterećenje od 100 kg .....	52
Slika 6.17. Kodirane i nekodirane točke prepoznate na fotografiji (zeleno).....	52
Slika 6.18. Oblak točaka te prikaz fotografija napravljenih u jednoj fazi.....	53
Slika 6.19. Ovisnost sile opterećenja i rezultirajućeg pomaka.....	54
Slika 6.20. Profil 1: raspodjela pomaka uslijed opterećenja od 100 kg .....	55
Slika 6.21. Profil 2: raspodjela pomaka uslijed opterećenja od 100 kg .....	55
Slika 6.22. Profil 3: raspodjela pomaka uslijed opterećenja od 100 kg .....	56
Slika 6.23. Uređaj za ispitivanje žilavosti po Izodu.....	57

Slika 6.24. Ispitivanje žilavosti po Izodu: a) ispitno tijelo u čeljustima, b) udar bata u ispitno tijelo.....	58
Slika 6.25. Rezultati određivanja žilavosti po Izodu.....	59
Slika 6.26. Ispitna tijela profila 3 nakon provedeno ispitivanja žilavosti po Izodu .....	60
Slika 6.27. Raslojavanje ispitnih tijela .....	60
Slika 6.28. Kidalica <i>Shimadzu AG-X plus</i> .....	61
Slika 6.29. Rezultat razvlačenja ispitnog tijela od staklenog mata .....	63
Slika 6.30. Ispitno tijelo profila 2: a) prije ispitivanja, .....	63
Slika 6.31. Ispitno tijelo profila 3_ a) prije, b) nakon ispitivanja .....	64
Slika 6.32. Dijagram rasteznog naprezanje-istezanje kompozita M-R .....	66
Slika 6.33. Dijagram rasteznog naprezanje-istezanje kompozita MT-R.....	66
Slika 6.34. Dijagram rasteznog naprezanje-istezanje kompozita UMT-R.....	67
Slika 6.35. Dijagram rasteznog naprezanje-istezanje za sve ispitivane kompozite .....	67
Slika 6.39. Ispitivanje ispitnog tijela profila 1: a) prije ispitivanja, b) tokom ispitivanja.....	69
Slika 6.40. Ispitivanje ispitnog tijela profila 3: a) prije ispitivanja, b) tokom ispitivanja.....	69
Slika 6.41. Oštećenje ispitnog tijela UMT-S-2 uslijed ispitivanja.....	70
Slika 6.42. Oštećenje ispitnog tijela M-S-4 uslijed ispitivanja .....	70
Slika 6.43. Dijagram savojnog naprezanja – istezanje za hibridni kompozit .....	72
Slika 6.44. Dijagram savojnog naprezanja – istezanje za mat-tkanina kompozit .....	72
Slika 6.45. Dijagram savojnog naprezanja – istezanje za mat kompozit .....	73
Slika 6.46. Dijagram savojnog naprezanja – istezanje usporedno za sve kompozite .....	73

**POPIS TABLICA**

Tablica 2.1. Svojstva kompozita s epoksidnom smolom [5].....	9
Tablica 2.2. Svojstva kompozita s vinil-esterskim smolama [5].....	10
Tablica 2.3 Svojstva vlakana [14] .....	16
Tablica 4. Rezultati mjerenja sustavom <i>Tritop</i> .....	53
Tablica 5. Rezultati ispitivanja rastezних svojstava .....	65
Tablica 6. Rezultati ispitivanja savojnih svojstava .....	71
Tablica 7. Usporedba profila.....	74
Tablica 8. Izmjerene vrijednosti širine ispitnih tijela za određivanje žilavosti po Izodu.....	78
Tablica 9. Izmjerene vrijednosti debljine ispitnih tijela za određivanje žilavosti po Izodu.....	79
Tablica 10. Rezultati određivanja žilavosti po Izodu.....	79
Tablica 11. Dimenzije ispitnih tijela za određivanje rastezних svojstava .....	81
Tablica 12. Debljina ispitnih tijela za ispitivanje savojnih svojstava .....	82
Tablica 13. Širina ispitnih tijela za ispitivanje savojnih svojstava.....	83
Tablica 14. Rezultati ispitivanja savojnih svojstava UMT ispitnih tijela .....	84
Tablica 15. Rezultati ispitivanja savojnih svojstava M ispitnih tijela.....	84
Tablica 16. Rezultati ispitivanja savojnih svojstava MT ispitnog tijela .....	85

## POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
$A_0$	$\text{mm}^2$	površina poprečnog presjeka ispitnog tijela
$a_i$	$\text{kJ/m}^2$	žilavost
$b$	$\text{mm}$	širina ispitnog tijela
$E_c$	[J]	energija loma
$E_f$	$\text{N/mm}^2$	modul savojnosti
$E_m$	$\text{N/mm}^2$	modu elastičnosti materijala matrice
$E_r$	$\text{N/mm}^2$	modul rastezljivosti
$F_{\max}$	N	maksimalna sila
$F_p$	N	prekidna sila
$h$	$\text{mm}$	debljina ispitnog tijela
$L$	$\text{mm}$	razmak oslonaca
$l_0$	$\text{mm}$	početna duljina
$n_i$	$\text{min}^{-1}$	broj okretaja jezgre
$R_i$	m	polumjer jezgre
$R_m$	$\text{N/mm}^2$	rastezna čvrstoća
$R_p$	$\text{N/mm}^2$	prekidna čvrstoća
$V_i$	%	volumni udio konstituenta
$V_m$	%	volumni udio materijala matrice
$V_f$	%	volumni udio materijala vlakna
$v_n$	$\text{m/s}$	brzina gibanja namotavalice
$\Delta l$	$\text{mm}$	produljenje
$\varepsilon$	%	istezanje
$\rho_c$	$\text{kg/m}^3$	gustoća kompozita
$\rho_i$	$\text{kg/m}^3$	gustoća i-tog konstituenta

$\rho_m$	$\text{kg/m}^3$	gustoća materijala matrice
$\rho_f$	$\text{kg/m}^3$	gustoća materijala vlakna
$\sigma$	$\text{N/mm}^2$	rastezno naprezanje
$\sigma_{fM}$	$\text{N/mm}^2$	savojna čvrstoća

## **POPIS KRATICA**

KRATICA	OPIS
PAN	Poliakrilonitril
TPO	Termoplastični olefin
PP	Polipropilen
SMC	Sheet Moulding Compound
BMC	Bulk Moulding Compound
RTM	Resin Transfer Moulding



**SAŽETAK**

Razvoj gospodarskih vozila slijedi trndove globalne automobilističke industrije te dijeli iste ciljeve poput smanjenja mase vozila odnosno poboljšanja učinkovitosti i smanjenja štetnih sastojaka emisije dimih plinova. Primjenom kompozitnih materijala inženjeri nastoje odgovoriti na te izazove što ima za posljedicu širi i značajniji razvoj kompozitnih tvorevina.

Ovim radom dan je pregled primjene kompozitnih materijala u gospodarskim vozilima te su opisani proizvodni postupci koji se najčešće primjenjuju u industriji gospodarskih vozila.

U radu je ponuđeno konceptualno rješenje podnice niskopodnog električnog autobusa kao izvrsnog primjera spoja globalnih trendova elektrifikacije javnog prijevoza i primjene kompozitnih materijala u strukturi vozila. Element podnice razmatran je u nekoliko kombinacija izrade kompozitnog materijala svojstvenih za gospodarska vozila.

U eksperimentalnom dijelu rada izrađeno je tri varijante elementna podnice koji su ispitivani optičkim mjernim sustavom. Provedena su ispitivanja svojstava, žilavosti rastezljivih svojstava sa ispitnim tijelima od materijala elementa podnice. Na temelju rezultata ispitivanja izvedeni su zaključci o prikladnosti materijala za element podnice.

Ključne riječi: kompozitni materijal, gospodarsko vozilo, podnica, žilavost, savojna svojstva, rastezna svojstva

**SUMMARY**

Development of commercial vehicles follows global trends in the automobile industry and shares the same goals of mass reduction, increasing vehicle efficiency and reducing harmful emission. Implementation of the composite materials is the way engineer's try to achieve these goals which leads to significant research and development of the composite materials

This thesis offers an overview of the composite materials applied in contemporary commercial vehicles and processes which are commonly used in composite production. A concept solution for the floor platform in form of a structural member is presented.

Experimental part of this thesis is focused on the production of three composite type profiles used as a structural member of the platform. Profiles are tested under load by optical measurement system. Composite samples are tested for tensile and flexural properties. Using the test results the profile variants are analyzed.

Keywords: composite material, commercial vehicle, bus, tensile strength, toughness

## 1. UVOD

Život ljudi je od pamtivijeka vezan za konstrukcije u općem smislu riječi. Od prvih oruđa odnosno alata čovjek je primjenom znanja i vještina nastojao prerađivati dostupni materijal u konstrukcije koje su mu bile potrebne. Suština konstrukcije u doslovnom smislu riječi jest materijal od koje je sačinjena, jasno je da bez materijala konstrukcija ostaje samo apstraktna ideja. Važnosti materijala svjedoči i sama činjenica da se čitava doba ljudske povijesti nazivaju po materijalima koji su se upotrebljavali (kamenno, željezno i bakreno doba). Jasno je da je razvoj tehnike i tehnologije sofisticirao preradu materijala te to još uvijek čini.

Materijal koji smo upotrebljavali i koji i dalje primjenjujemo definiran je i ograničen svojim svojstvima u sirovoj i u prerađenoj formi. Svojstva materijala mogu biti prirodna činjenica (gustoća željeza, tvrdoća kamena) no mogu biti i plod ljudske ruke, odnosno ljudske intervencije u prirodnu formu. Takvom intervencijom od komponenti koje imaju zasebna svojstva nastaje materijal željenih svojstava. Upravo to je ideja kompozitnog materijala, odnosno njegova definicija: višekomponentni materijal svojstava kakvih niti jedna komponenta ne posjeduje zasebno.

### 1.1. Povijest kompozitnog materijala

U širem smislu povijesti koncept kompozitnog materijala se pojavljuje u prirodi još u doba devona (dio paleozoika) u formi materijala kojeg čini celuloza (polimer) i lignin (vezivno tkivo). Materijal zovemo drvo, a u prirodi se pojavljuje kao stablo koja su se na Zemlji prvi put oformila u kasnom devonu (360-380 milijuna godina pr. Kr.) [1].

Kada razmatramo povijest u užem smislu kompozitni materijal se počinje primjenjivati pojavom prvih stalnih naseobina, odnosno nedugo nakon prelaska na sjedilački način života. Najraniji primjer primjene kompozita jest primjena drvenkastih šiba u isprepletenoj formi te oblaganje takvog zida blatom, glinom ili životinjskim izmetom. Takvi objekti pojavljuju od 6 000 godina pr. Kr.). Materijal od različito usmjerenih drvenih vlakana spojenih ljepljivom primjenjivali su u Mezopotamiji 3 400. godina pr. Kr., a možda prvi primjer upotrebe kompozita

koji je značajno utjecao na povijest svijeta je luk kojeg su izrađivali Mongoli 1 200 godina pr.Kr.[2].

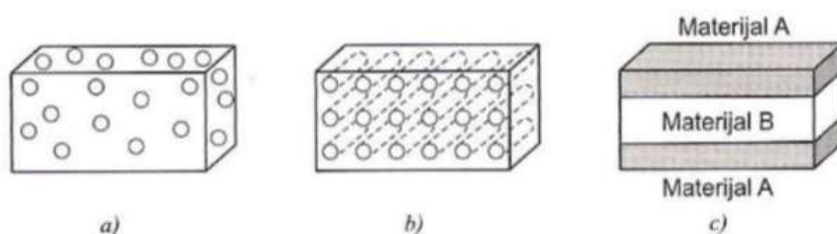
Materijal napravljen od drvenih vlakana, vlakana bambusa, životinjskih rogova i tetivi u matrici koju je činila prirodna smola bio je temelj za izradu kratkih lukova koje su mogli upotrebljavati na konjima te tako biti u značajnoj strateškoj prednosti tijekom osvajanja. [3]

Novo doba u primjeni kompozita omogućeno je izumom sintetičkih smola odnosno bakelita kojeg je 1907. godine izumio Leo Hendrik Baekeland. Ovaj američki kemičar otkrio je način da celulozom smanji krhkost sintetičke smole u krutom stanju. Važan događaj u razvoju kompozita je i postupak proizvodnje staklenih vlakana kojeg je razvila tvrtka *Owens Illinois Glass Company* u kasnim 1930-tim godinama. Pronađen je način kako staklo proizvesti u formi tankih niti te pletenje takvih niti u obliku tekstilnog materijala. U kombinaciji s, već tada poznatim, sintetičkim smolama stvoren je lagani kompozitni materijal od kojeg su inženjeri spomenute tvrtke napravili čamac na vesla (eng. *dinghy*). [2]

Svi ovi događaji utrli su put prema snažnom industrijskom razvoju i primjeni kompozitnih materijala. Ovaj razvoj se nastavlja i danas zbog težnje za manjom potrošnjom energije, boljom cijenom proizvoda te što manjim utjecajem na okoliš.

## 2. KOMPOZITNI MATERIJALI

Primjena kompozita u raznim granama industrije i ljudskog djelovanja dovela je do širokog raspona elemenata koji čine kompozit. Osnovnu formu kompozitnog materijala čine matrica i ojačavalo. Nužan uvjet postojanja kompozita je adhezija između ova dva elementa odnosno njihova kompatibilnost. Kompozitne materijale je moguće razvrstati u tri osnovne skupine: česticama ojačani kompoziti, vlaknima ojačani kompoziti te strukturne kompozite (slika 2.1).

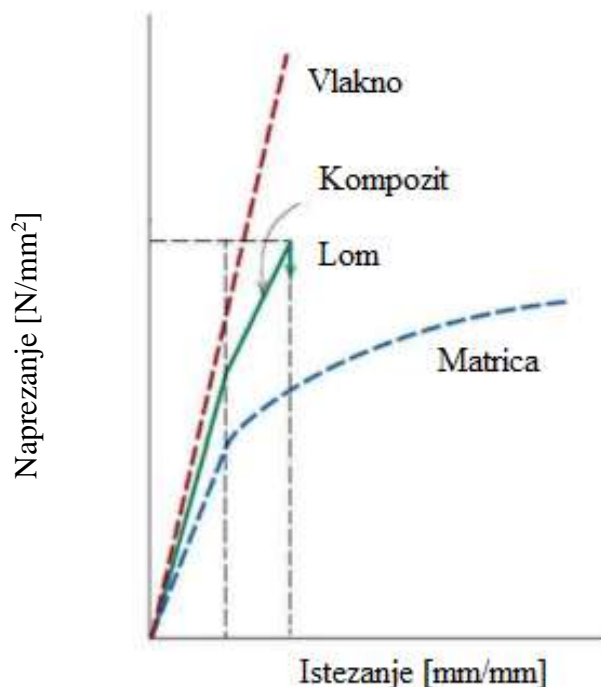


Slika 2.1. Vrste kompozita: a) česticama ojačani, b) vlaknima ojačani, c) strukturni kompozit [3]

Kako je kompozit materijal “krojenih” svojstava ukupna svojstva prvenstveno ovise o vrsti konstituenata, zatim o njihovom udjelu, obliku te strukturi. Najveća prednost kompozita, odnosno svojstvo koje opravdava njihov razvoj i primjenu je specifična čvrstoća, odnosno relativno visoka rastezna čvrstoća obzirom na gustoću i masu materijala. Kompozitima je moguće postići i povoljan odnos modula elastičnosti i krutosti, izvrsnu postojanost na koroziju i utjecaj atmosferilija, dobru dimenzijsku stabilnost te željenu toplinsku i električnu provodnost ili izolaciju. [4,5]

Budući da je tehnološki aspekt izrazito važan već u konstrukcijskoj fazi proizvoda u slučajevima potrebe za izradom elemenata složenijeg oblika kompoziti su izvrstan odabir, a čak je moguće spajanje dijelova tijekom proizvodnog procesa. Jednostavni postupci proizvodnje, dugi vijek trajanja te jednostavnost za održavanje samo su neka od poželjnih svojstava kompozita koja zadovoljavaju zahtjeve brojnih grana industrije. [5]

Na slici 2.2 prikazan je odnos naprezanja i istežanja konstituenata kompozita te je time moguće zorno prikazati svrhu kompozitnog materijala, postizanje željenih svojstava kakva niti jedna komponenta zasebno ne posjeduje. [4]



Slika 2.2. Dijagram naprezanje-istežanje konstituenata i kompozita [4]

U pogledu utjecaja konstituenata kreiranje svojstava kompozita definirano je Zakonom mješanja koji glasi: [4]

$$\rho_c = \sum V_i \cdot \rho_i \quad (1)$$

Gdje su:

$V_i$  – [%] volumni udio i-tog konstituenta,

$\rho_c$  - [kg/m<sup>3</sup>] gustoća kompozita,

$\rho_i$  – [kg/m<sup>3</sup>] gustoća i-tog konstituenta.

Odnosno u obliku za kompozite s jednim ojačavalom (npr. vlaknima):

$$\rho_c = V_m \cdot \rho_m + V_f \cdot \rho_f \quad (2)$$

Gdje su:

$V_m$  – [%] volumni udio materijala matrice,

$V_f$  – [%] volumni udio materijala vlakana,

$\rho_m$  – [kg/m<sup>3</sup>] gustoća materijala matrice,

$\rho_f$  – [kg/m<sup>3</sup>] gustoća materijala vlakna.

Zakon mješanja moguće je primjeniti i za predviđanje modula elastičnosti:

$$E_c = V_m \cdot E_m + V_f \cdot E_f \quad (3)$$

Gdje su:

$E_c$  – [N/mm<sup>2</sup>] modul elastičnosti kompozita,

$E_m$  – [N/mm<sup>2</sup>] modul elastičnosti materijala matrice,

$E_f$  – [N/mm<sup>2</sup>] modul elastičnosti materijala vlakana.

Čvrstoća kompozita ovisi o jakosti veza između matrice i ojačavala što je uzrok nešto nižih stvarnih vrijednosti rastezne čvrstoće od predviđenih zakonom mješanja. [4] Kompoziti mogu biti izotropni i anizotropni materijali, što je uvjetovano strukturom (orijentacijom) ojačavala. [4]

Temeljna i najčešća podjela kompozitnih materijala je prema materijalu matrice i obliku ojačavala. [4]

Matrica ima ulogu prenošenja opterećenja na ojačavalo, zaštitu ojačavala te pruža duktilnost cijelog materijala. Matrica također daje završnu formu kompozita te ga štiti od atmosferskih utjecaja (jedna od značajnih prednosti kompozitnih materijala je antikorozivnost). Podjela prema materijalu matrice grupira kompozite na kompozite s polimernom matricom te metalnom i keramičkom matricom. Ojačavala je također moguće promatrati u te tri osnovne grupe, no ona se češće dijele prema obliku ojačavala i to na vlakna, čestice i viskere. Ojačavala povišuju čvrstoću kompozitnog materijala, modul elastičnosti (krutost) te otpornost na trošenje. Česticama se postiže efekt ojačavanja zahvaljujući usporenom gibanju dislokacija u materijalu. Efekt ojačavanja je kod kompozita ojačanih vlaknima najveći, a on ovisi o duljini i promjeru vlakana. Već spomenuta mogućnost dobivanja izotropnog ili anizotropnog materijala ovisi upravo o rasporedu i duljini vlakana. [4]

Kompoziti su višefazni materijali s mogućnošću prilagodbe svojstava, a budući da je moguće kombinirati materijale možemo govoriti i o zasebnoj skupini kompozita tzv. hibridnim kompozitima. [4]

Hibridni kompoziti su materijali u kojima se kao ojačavala javlja više vrsta materijala (staklena i ugljična vlakna u polimernoj matrici) ili čak više oblika ojačavala (primjerice armirani beton). Upotreba prirodnih vlakana kao ojačavala sve je češća zbog širenja svijesti o održivom razvoju pa biokompoziti kao materijali s polimernom matricom i biljnim ili životinjskim vlaknima čine zasebnu cjelinu. [4]

Kompoziti se, gledajući prema materijalu konstituentata, pojavljuju kao: [4]

- Metalno-metalni
- Metalno-keramički
- Metalno-polimerni
- Keramičko-polimerni
- Keramičko-keramički
- Keramičko-metalni
- Polimerno-polimerni
- Polimerno-metalni

## 2.1. Podjela prema materijalu matrice

Odabir materijala matrice vrši se prema kriteriju kompatibilnosti s ojačavalom, odnosno sposobnosti osiguravanja dobre adhezije između materijala matrice i materijala ojačavala. Kompozite prema materijalu matrice dijelimo u tri glavne skupine: [4]

- Kompoziti s metalnom matricom
- Kompoziti s polimernom matricom
- Kompoziti s keramičkom matricom

Matrica daje duktilnost kompozitu, štiti ojačavalo od mehaničkog oštećenja i utjecaja atmosfere no pri izradi kompozita teži se da je udio matrice što manji budući da je ona često konstituent koji najviše doprinosi masi kompozita. Transportna industrija najviše primjenjuje kompozite s polimernom matricom no trendom hibridizacije vozila putničkog prijevoza sve je veći broj primjena i ostalih oblika matrica (dijelovi elektromotora pogonskog sklopa autobusa, kočnice, itd.)



### 2.1.1. Kompoziti s metalnom matricom

Kompoziti s metalnom matricom se u automobilskoj i industriji transporta upotrebljavaju zbog potreba za smanjenjem mase uz zadržavanje mehaničkih svojstava, odnosno kako bi se odgovorilo na zahtjeve za smanjenjem emisija štetnih sastojaka dimnih plinova, manje potrošnje goriva i boljih performansi vozila. Dijelovi na kojima se primjenjuju ovi materijali su visoko opterećeni dijelovi pogonskog sustava (radilice motora, klipnjače, cilindri i klipovi) te kućišta motora i dijelovi kočnica. [6]

Metalne matrice (aluminijske ili čelične) ojačane česticama ili vlaknima omogućuju smanjenje mase i dimenzija dijelova zbog svoje vrlo dobre specifične čvrstoće. Ojačavala su većinom keramički materijali poput SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> i bora, a ojačanja u formi diskontinuiranih vlakana su najčešće staklena ili ugljična vlakna. [4]

Svojstva poput samopodmazivanja i otpornosti na trošenje i zamor materijala čine ih dobrim rješenjem za pokretne dijelove klipnih mehanizama motora. Kod konstruiranja motora težnja ka što manjim oscilirajućim masama omogućuje postizanje viših brzina vrtnje motora što je jedan od dva moguća načina povećanja snage motora. [7]

Dodavanje ojačavala u obliku čestica (disperzija), viskera, kontinuiranih ili diskontinuiranih vlakana nema značajan utjecaj na gustoću materijala pa je prednost upotrebe aluminija zadržana čemu svjedoči i činjenica da je aluminijska matrica najčešći oblik metalne matrice u kompozitima korištenima u vozilima. Svugdje gdje se traži sposobnost rada pri višim temperaturama, a u isto vrijeme dobra toplinska i električna provodnost ovakvi kompoziti imaju opravdanu primjenu. [4]

### 2.1.2. Kompoziti s keramičkom matricom

Dijelovi vozila koji su visokopterećeni i izloženi visokim temperaturama najčešće su mjesta primjene kompozita s keramičkom matricom. Ovakvi kompoziti zadržavaju prednosti keramičkog materijala (postojanost na abraziju i visoke temperature), a poboljšavaju nedostatke vezane za keramičku matricu (sklonost krhkom lomu, niska lomna žilavost). Kompozite čine matrice od SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, AlN ili ZrO<sub>2</sub>, a ojačavala u formi vlakana, viskera ili čestica su nerijetko isti materijal. Povišenje čvrstoće i lomne žilavosti posljedica je nekoliko mehanizama za

usporivanje napredovanja inicijalne pukotine u materijalu matrice. Kompoziti ojačani česticama transformacijom faze „zatvaraju“ vršak pukotine, dok kompoziti ojačani vlaknima ili viskerima napredovanje pukotine sprječavaju mehanizmima preraspodjele naprezanja, apsorbcije energije ili premošćivanjem pukotine. [4]

Razvoj motora u smjeru koncepta *downsizinga*, ali i sve zahtjevniji zahtjevi Euro normi, dovode do primjene kompozita s keramičkom matricom u elementima motora gospodarskih vozila. Zahtjev za nabijanjem motora i direktnim ubrizgavanjem u svrhu smanjenja emisije štetnih sastojaka dimnih plinova dovodi do ostvarivanja visokih tlakova kod sustava za ubrizgavanje goriva, a što posljedično diktira primjenu kompozita s keramičkom matricom kao materijala za elemente takvih sustava. Konstrukcije motora gospodarskih vozila s direktnim ubrizgavanjem moraju imati brizgaljke nove generacije kojima se ubrizgavanje goriva ostvaruje mehanizmom piezoelektričnog principa, odnosno pomični dijelovi brizgaljke koji su izrađeni od keramičkih kompozita s kojima je moguće ostvariti piezoelektrični efekt. Ovakvi kompoziti imaju relativno visoku cijenu pa se kod gospodarskih vozila ne primjenjuju na mjestima kao i kod sportskih vozila (kočnice, ventili, itd.). [8,9]

### 2.1.3. Kompoziti s polimernom matricom

Interes za primjenom materijala koji je lagan, jeftin, a zadovoljavajućih mehaničkih i antikorozivnih svojstava poticao je razvoj kompozita s polimernom matricom. Kompoziti s polimernom matricom (eng. *PMC*) su najstarija vrsta kompozita za industrijsku primjenu.

Polimerne matrice primjenjuju se u dvije osnovne vrste materijala: duromerne i plastomerne matrice.

Duromeri su polimerni materijali gustih prostorno umreženih makromolekula. U umreženom stanju zagrijavanjem ne mekšaju, odnosno povećanjem radne temperature njihova mehanička svojstva ostaju ista. Često se upotrebljavaju jer su relativno niske cijene, tijekom proizvodnje ne zahtjevaju visoke temperature, a smole koje se primjenjuju su dobre tečljivosti te ostvaruju dobru vezu s vlaknima. [4]

U nastavku rada će se obraditi tri najčešće primjenjivane duromerne smole kod gospodarskih vozila. Poliesterska smola primjenit će se u eksperimentalnom dijelu rada.

Epoksidne smole su viskozne kapljevine koje nakon miješanja dviju komponenti umrežuju u kalupu. Proces umreživanja uzrokuje promjenu agregatnog stanja iz kapljevito, preko gel u kruto stanje, a vrijeme od početka reakcije do trenutka kada je smola u prijelaznom (gel) stanju zovemo otvoreno radno vrijeme. Reakcija umreživanja ne zahtjeva povišene temperature (moguće je ostaviti kalup pri sobnoj temperaturi) no primjenjivost takvih smola je do 50 °C. Reakcija umreživanja je egzotermna zbog čega je potrebno pravilno odrediti potreban odnos komponenti budući da umreživalo (katalizator) može potaknuti pretjerano oslobađanje topline što potencijalno dovodi do degradacije matrice ili kompozita u cjelini. [5]

Nakon polimerizacije, epoksidne smole tvore matricu dobrih mehaničkih svojstava u pogledu čvrstoće (tablica 2.1), postojanu na koroziju i utjecaj vlage. Prednost epoksidnih smola je njihova niska viskoznost zbog koje dobro natapaju vlakna i smanjuju mogućnost zakrivljenja vlakana tijekom lijevanja (zadržana željena usmjerenost). Nedostaci ovakvih matrica su relativno teško dobivanje žilavosti i postojanosti pri povišenim radnim temperaturama, degradacija uslijed izloženosti UV zračenju te visoka cijena u odnosu na poliesterske smole. [5]

Tablica 2.1. Svojstva kompozita s epoksidnom smolom [5]

	Gustoća kg/m <sup>3</sup>	Tlačna čvrstoća MPa	Modul elast. GPa	Smična čvrstoća MPa	Smični modul GPa	Rastezna čvrstoća MPa	Vol. udio vlakana %
Ugljična vlakna/ Epoksidna smola	1600	570	70	90	5	600	50
E- staklena vlakna/ Epoksidna smola	1900	415	-	-	-	490	50-60

Poliesterske smole su mješavine poliestera i monomera, najčešće stirena zahvaljujući kojem se smanjuje viskoznost ovih smola u kapljevitom stanju te dobiva na očvršćivanju jer je dodatkom stirena bolje povezivanje molekula. Polimerizacijom su slične epoksidnim smolama, umrežuju egzotermnom reakcijom koja je intenzivnija u oslobađanju topline i skupljanju materijala (problem unesenih zaostalih naprezanja). Češće se primjenjuju zbog niže cijene u odnosu na epoksidne smole. Mehanička svojstva su im dobra no osjetljivije su na krhki lom. Odlikuje ih izvrsna postojanost na atmosferske uvjete no imaju ograničen rok trajanja jer tijekom vremena prelaze u gel stanje. [4, 5]

Vinil esterske smole su češće primjenjivane od poliesterskih, imaju bolja mehanička svojstva (tablica 2.2) jer ostvaruju jače veze s vlaknima. Sličnost s poliesterima im je i u procesu polimerizacije, on se događa pri nižim temperaturama no zajedničko im je skupljanje (kod vinil esterskih smola je čak izraženije). Kemijska postojanost im je kao i kod epoksidnih smola, a različitim premazima moguće je poboljšati njihovu otpornost na UV zračenje (česta im je primjena u brodogradnji). [4, 5]

Tablica 2.2. Svojstva kompozita s vinil-esterskim smolama [5]

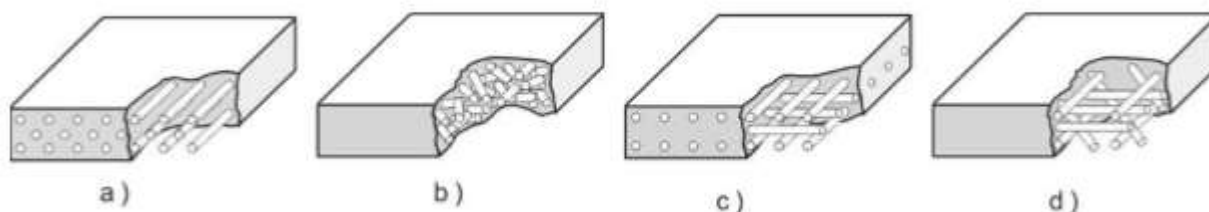
	Gustoća kg/m <sup>3</sup>	Tlačna čvrstoća MPa	Modul elast. GPa	Savojna čvrstoća MPa	Smični modul GPa	Rastezna čvrstoća MPa	Vol. udio vlakana %
Ugljična vlakna/ vinil-ester smola	1500- 1650	900- 1100	65-85	800- 1000	136	900-1200	55-60
Poliaramidna vlakna/ Vinil-ester smola	1200- 1400	415	17-22	150-250	-	800-1000	50-60

Plastomerni materijali građeni su od linearnih lančastih makromolekula polimera te pri zagrijavanju mekšaju odnosno tale se, no hlađenjem ponovno očvršćavaju. Takvo ponašanje posljedica je prirode veza koje su formirane u plastomerima, naime zagrijavanjem dolazi do titranja atoma oko ravnotežnih položaja što prekida sekundarne veze odnosno omogućeno je uzajamno pomicanje lanaca makromolekula polimera (tečenja plastomera). Sposobnost materijala da omekšava i stvrdnjava ovisno o temperaturi osnova je njegove preradbe i recikliranja no i ograničenje u primjeni (porastom temperature plastomerima raste deformabilnost). [4]

Od plastomera najčešće se kao matrica primjenjuju polipropilen i poliamid koji je i najčešće primjenjivan u transportnoj industriji. Polipropilenska matrica ima dobru specifičnu čvrstoću i izdržljivost, dobra svojstva upijanja vibracija (važno kod konstrukcije vozila), korozijsku postojanost, otpornost na atmosferske utjecaje te nisku gustoću. Široko se primjenjuje u izradi dijelova za vozila (odbojnici, maske, poklopci, itd.).

## 2.2. Podjela prema vrsti ojačavala

Ojačavalo je dio kompozita koji preuzima opterećenje, a u industriji gospodarskih vozila se kao ojačavalo najviše primjenjuju vlakna. Dva osnovna oblika ojačavala, čestice i vlakna, mogu se kombinirati pa time nastaje hibridni kompozit. Odabir vrste vlakana, promjera, duljine i orijentacije od presudne je važnosti pri konstruiranju željenog kompozitnog materijala (principi usmjerenosti vlakana kao ojačavala prikazani su na slici 2.3).



Slika 2.3. Različiti načini rasporeda vlakana a) kontinuirano jednosmjerna vlakna b) slučajno usmjerena diskontinuirana vlakna c) ortogonalno raspoređena vlakna d) višesmjerno usmjerena vlakna [4]

Kod česticama ojačanih kompozita nastoji se ostvariti jednolično raspoređene čestice tvrdog i krhkog materijala u mekanijoj i duktilnijoj matrici. Razlika između metalnih legura i kompozita ojačanog česticama je u tome što kod kompozita ne dolazi do transformacije faza materijala. [4]

### 2.2.1. Vlaknima ojačani kompoziti

Materijal matrice s kojom se spajaju vlakna definira tražena svojstva vlakana. Osim kompatibilnosti, odnosno postojanja adhezije između vlakna i matrice, vlakna imaju ulogu očvršćivanja ili davanja žilavosti kompozitu. Keramičke matrice su krhke te su kod njih vlaknima omogućuje bolja duktilnost kompozita, dok su polimerne matrice relativno niske čvrstoće pa vlakna u tom slučaju doprinose povišenoj čvrstoći kompozita. [4]

Najveće očvršćenje kompozita moguće je postići upotrebom vlakana kao ojačavala i to u strukturi višesmjerno kontinuiranih vlakana (slika 2.3.d), no uvjet za očvršćenje je jaka veza između materijala vlakna i matrice. Vlakna čine mrežu kojom se opterećenje raspoređuje odnosno energija se raspršuje duž kompozita. Vlakna prema promjeru možemo podijeliti na

žice, vlakna i viskere. Viskeri su niti s izrazito velikim odnosom duljine naspram promjera, to su keramički monokristali, dakle jedna nit je jedno kristalno zrno. Mogu biti od ugljika, SiC ili  $Al_2O_3$ . [5]

U uporabi izrade kompozita su najčešća staklena, ugljična i aramidna vlakna te cijeli niz biljnih vlakana. Promjer vlakana je u rasponu od 0,1  $\mu m$  do 1 mm. Ukoliko se izrađuju tkanine niti su povezane u struk kao na slici 2.4. [4]



Slika 2.4 Struk staklenih vlakana [10]

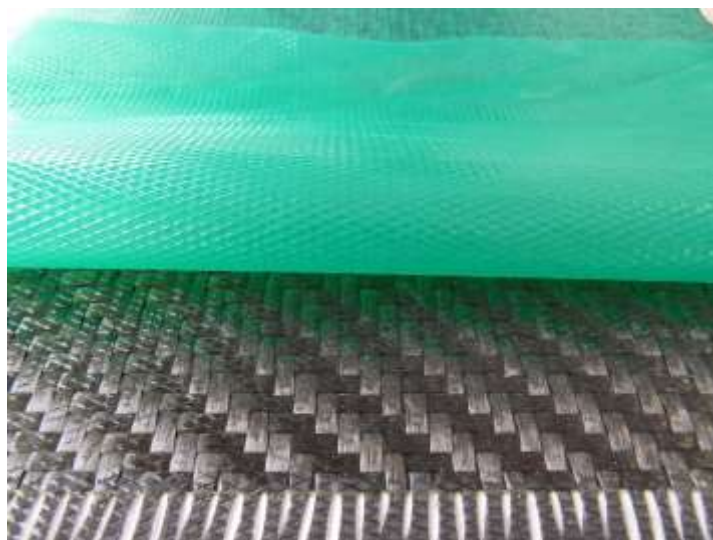
Vlakna je moguće postavljati pojedinačno no otvoreno radno vrijeme smola koje se često primjenjuju u kombinaciji s vlaknima zahtijeva relativno brzu izradu. Iz tog, ali i praktičnih razloga, vlakna se pletu u tkanine s različitim rasporedima ili čak vrstima vlakana. Tkanine je moguće izraditi i iz više vrsta strukova te s različitim uzorcima odnosno strukturom vezenja. Uz tkanine vlakno se proizvodi i u formi mata ili preprega. [5]

Mat (slika 2.5) je materijal sačinjen od diskontinuiranih vlakana koja su povezana tako da čine kompaktnu cjelinu (ljepilom koje u dodiru s matricom ishlapi), a moguće ga je lako moguće oblikovati i natopiti smolom. Kompozit izrađen s matom ima izotropna svojstva budući da su vlakna u matu nasumično orijentirana. [5]



Slika 2.5. Mat staklenih vlakana proizvođača *Hacotech* [11]

Prepreg (slika 2.6) je sloj tkanine i smole koja je djelomično umrežena, tijekom izrade kompozita je u gelovitom stanju te zahtjeva skladištenje pri temperaturama nižim od 7 °C jer više temperature pospješuju postupak polimerizacije smole. Primjena preprega omogućava postizanje anizotropnih svojstava u smjeru vlakana, skraćuje proizvodni proces no ovakvi kompoziti moraju biti umrežavani primjenom autoklava. [5]



Slika 2.6. Prepreg proizvođača *Haufler* [12]

Staklena vlakna primjenjuju se u većini kompozita s polimernom matricom. Nastaju tehnološkom obradom staklene taljevine koja uključuje i nanošenje aperture, sloja tvari kojom je omogućena dobra adhezija s većinom polimernih smola (epoksidnim, fenolnim i nezasićenim poliesterskim). Dostupna su u formi sipine komadića, tkanina i mata. Ova vlakna su pristupačne cijene, a dobrih mehaničkih svojstava pa su čest odabir kod kompozita za izradu poklopaca, pregrada, sjedala ili panela u vozilima za prijevoz putnika. Na tržištu se pojavljuju u skupinama definiranim kemijskim sastavom (različiti oksidi elemenata koji tvore staklo) i primjenom. [5]

Staklena vlakna dijele se na: [5]

- E staklo – primjenjuju se kod elektroničkih uređaja budući da imaju dobra izolacijska svojstva
- C staklo – dobra kemijska postojanost
- S staklo – upotreba pri višim temperaturama
- D staklo
- A staklo
- R staklo

Ugljikova vlakna imaju skoro pet puta višu rasteznu čvrstoću od čelika i skoro dvostruko višu krutost. To je izrazito lagan materijal, kemijski i toplinski vrlo postojan, odlične otpornosti obzirom na zamor materijala te male toplinske rastezljivosti. Ugljikova vlakna nastaju postupkom karbonizacije i grafitizacije bez prisustva kisika. Radi se o toplinskom procesu pri vrlo visokim temperaturama na kojima se postiže željena struktura vlakana (mikrostruktura im je slična grafenu). Sirovina za izradu je vrlo često vlaknasti PAN (poliakrilonitril), a ovisno o parametrima postupka proizvodnje dobiva se mikrostruktura koja daje ili vrlo visoku rasteznu čvrstoću ili vrlo visoki modul rastezljivosti. Moguće ih je proizvesti u svim već navedenim formama (slika 2.7), a vrlo često se izrađuju već gotovi poluproizvodi (ploče, profili) budući da su ugljikova vlakna vrlo poželjan inženjerski materijal te imaju primjenu u širokom rasponu industrija. Kod gospodarskih vozila primjenjuju se u hibridnim kompozitima za ojačanja i okvire kod kojih je važna krutost. Njihova visoka cijena im je veliki nedostatak. [4, 5, 13]





Slika 2.7. Tkanina od ugljičnih vlakana

Aramidna vlakna su vlakna poliamida karakteristične žute boje. Imaju vrlo visoku žilavost, dobru čvrstoću i toplinsku postojanost te nižu cijenu od ugljičnih vlakana. Nedostatak im je osjetljivost na UV zračenje i relativno teška prerada. Uglavnom se primjenjuju u protubalističke svrhe tako da im je upotreba u transportnoj industriji ograničena na primjenu hibridnih kompozita koji trendovima hibridizacije i elektrifikacije vozila imaju sve značajniju ulogu. [5]



Slika 2.8. Hibridna tkanina, ugljična i aramidna vlakna [38]

U Tablici 2.3 prikazana su svojstva vlakana umjetnog podrijetla te se može zaključiti da svojstvima mogu konkurirati homogenim materijalima poput čelika ili aluminija budući da imaju povoljna mehanička svojstva, a znatno nižu gustoću od čelika ili aluminija.

Tablica 2.3 Svojstva vlakana [14]

Vlakno	Gustoća [g/cm <sup>3</sup> ]	Produljenje [%]	Rastezna čvrstoća [MPa]	Modul elastičnosti [GPa]
E stakleno	2,5	2,5-3,0	2000-3500	70
S stakleno	2,5	2,8	4570	86
Aramidno	1,4	3-3,7	3000-3150	63-67
Ugljikovo	1,4	1,4-1,8	4000	230-240

Prirodna vlakna poput vlakana konoplje, banane, jute i bambusa postaju sve učestaliji odabir uslijed trendova i zakonskih regulativa na vozila vezanih za održivi razvoj i recikliranje. Imaju relativno dobra mehanička svojstva, no najveća prednost ima je pristupačnost (bilo niskom cijenom bilo činjenicom da su sirovine za neka vlakna industrijski otpad) te biorazgradivost. Ozbiljan nedostatak ovih vlakana je njihova karakteristika da apsorbiraju vlagu što ih čini ne kompatibilnima sa smolama koja imaju hidrofobna svojstva. Nemogućnost adhezije s nekim matricama im je nedostatak, također zbog varijacija u svojstvima, ograničenošću temperaturom (biljna vlakna nemaju dobru vatrootpornost) u preradi, razvoj proizvodnih postupaka je izazov za budućnost. [4, 5]

### 2.2.2. Kompoziti ojačani česticama

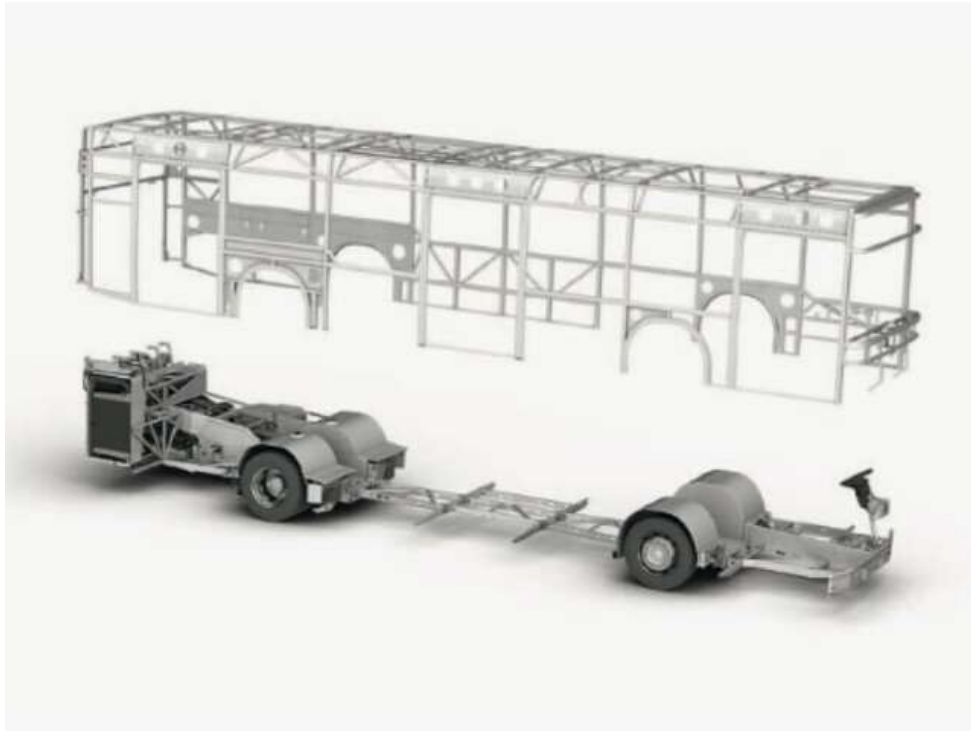
Čestice se kao ojačanje rabe uglavnom kod mekanijih i duktilnijih matrica. Obzirom na promjer čestica možemo ih podijeliti na čestice s disperzijom i kompozite s velikim česticama. Čestice promjera do 0,1 μm primjenjuju se kao disperzije, a čestice veće od 1 μm se smatraju velikim česticama. Kriterij podjele može biti i volumni udio čestica, pa su kompoziti s volumnim udjelom do 15 % kompoziti s disperzijom, a svi s volumnim udjelom višim od 20 % smatramo kompozitima s velikim česticama. Disperzija sprječava gibanje dislokacija u materijalu što dovodi do efekta očvršćenja, a o učinkovitost disperzije ovisi i razmak između čestica. Materijali čestica su tvrdi oksidi i moraju biti kemijski inertni prema materijalu matrice. [4]

### 3. Primjena kompozitnih materijala u transportnim vozilima

Smjerovi razvoja automobilske industrije na globalnom tržištu svake godine sve više i više slijede načela održivog razvoja i smanjenja utjecaja na okoliš. Motivirani konkurentnošću, ali i zakonskom regulativom koja je rezultat političkog djelovanja, proizvođači nastoje ispuniti zahtjeve za što nižom emisijom štetnih sastojaka dimnih plinova, potrošnjom goriva te što manjim ukupnim utjecajem na okoliš (od proizvodnje do razgradnje njihovih proizvoda). Kompozitni materijali koji su svoje početke imali u sportskim vozilima, postaju uobičajena pojava kod osobnih vozila, a zbog trendova hibridizacije i elektrifikacije počinju biti uobičajena primjena kod gospodarskih vozila, prvenstveno kod vozila javnog gradskog prijevoza. Kako sve više i više gradova u Europi zabranjuje uporabu vozila pogonjenih fosilnim gorivima u njihovim centrima nastaje tržišna prilika za proizvođače električnih autobusa. Politički ciljevi na gradskim, ali i državnim razinama traže veći udio električnih autobusa do kraja prve polovice 21. stoljeća. Kompozitni materijali su rješenje kojima je moguće zadovoljiti zahtjeve, a ostati konkurentan na tržištu vozila te sve više i više proizvođača to prepoznaje.

#### 3.1. Kompozitni materijali u strukturnim dijelovima vozila

Konstrukcija vozila za prijevoz putnika dosad je temeljena na dva dizajna: nadstruktura povezana sa samonosivom šasijom (tzv. poluintegrirani dizajn) te samonoseća struktura iz jednog dijela (tzv. integrirani dizajn). Prema [15] poluintegrirani dizajn (eng. *semintegrated design*, slika 3.1) čini samonosiva šasija na koju su spojeni pogonski sklop, sustav kočenja i upravljanja te elementi ovjesa i gornja rešetkasta struktura koja definira izgled putničkog prostora. S druge strane integrirani dizajn (eng. *integrated design*, slika 3.2) čini rešetkasta struktura od ekstrudiranih profila koja ima i ulogu šasije, dakle na koju su elementi pogona, odnosno stražnje i prednje osovine spojeni putem ojačanja. Ovakva dva klasična pristupa obilježila su konstrukciju autobusa dosad, no zahtjevi za niskim podom te modularnošću vozila otvaraju vrata primjeni kompozita u ovom dijelu proizvodnje autobusa. Tako tvrtka *MAN* definira i tzv. kompozitni dizajn (eng. *composite design*) koji ima obilježja prethodno spomenuta dva, tj. primjenjuje šasiju kao okvir od metalnih profila (tzv. *ladder type*) za prostor iza stražnje osovine i ispred prednje osovine, a kompozitnu rešetkastu konstrukciju za prostor između osovina. [16]



Slika 3.1. Poluintegrirani dizajn [15]



Slika 3.2. Integrirani dizajn [15]

Kompozitni materijali se primjenjuju kao elementi podova, stropa i bočnih stranica koji se postavljaju na nosivu konstrukciju. Primjer je autobus proizvođača *Yutong* (slika 3.3) koji je gradu Helsinkiju 2019. godine isporučio nekoliko desetaka električnih autobusa u kojima su bočni i podni paneli izrađeni od kompozita ojačanog staklenim vlaknima. Paneli su postavljeni na čeličnu nosivu rešetkastu konstrukciju, a dio profila korištenih na autobusu su također kompoziti od staklenih vlakana, korištenih u formi mata u kombinaciji sa poliesterskom smolom. Profile i panele izradila je tvrka *EXEL* koja ima dugu tradiciju u izradi kompozitnih panela i profila od ugljičnih i staklenih vlakana. [17]



Slika 3.3 Električni autobus proizvođača *Yutong* s *EXEL* kompozitnim elementima [17]

Bočni i podni paneli su primjeri primjene odličnih svojstava kompozita poput postojanosti na koroziju, jednostavnosti popravka te mogućnosti izrade složenijih oblika (jednodijelnih profila kroz koje je moguće jednostavnije montirati električne instalacije). [18]

Spomenuta mogućnost izrade složenijih oblika pokazuje se povoljnom kod izrade cijelokupnih bočnih strana autobusa ali i kompletne gornje konstrukcije vozila. Proizvođači poput *Proterra* već niz godina proizvode hibridne i električne autobuse na američkom tržištu s kojima, zahvaljujući kompozitima od staklenih vlakana, laminatima i sendvič konstrukcijama, prevoze putnike uz ispunjavanje svih kriterija na gradske autobuse, a uz minimalan utjecaj na okoliš. *Proterra EcoMark* autobusi koji su u svojim prvih sedam godina prevezli 175 milijuna putnika poslužili su kao izvor znanja i iskustva za razvoj autobusa *EcoRide* kod kojeg je primjenjen



kompozit ojačan E-staklenim vlaknima u obliku tkanja s višesmjerno usmjerenim vlaknima. Konstrukcija gornjeg dijela autobusa je proizvedena u dva kompozitna dijela koji su potom spojeni te kao jedno tijelo spojeni na malu metalnu nosivu konstrukciju (šasiju) (slika 3.4). [19]



Slika 3.4. *Bodywork* autobusa *EcoRide* proizvođača *Proterra* iz 2005 godine [19]

Model *Catalyst* je predstavljen 2013. godine te je potpuno električan autobus. Njegova monocoque samonosiva šasija je rezultat suradnje tvrtke *Proterra* i *TPI Composites Inc.* Šasija je sastavljena od nekoliko dijelova izrađenih od istih materijala, sendvič konstrukcija i laminata, koji su na kraju spojeni u cjelinu (slika 3.5). Krovni dio čini dva sendvič panela koji su oblikovani i s dijelovima okvira prozora, do donjeg ruba prozora (slika 3.6). Donji dio je nosiva konstrukcija za mjesta za spajanje sa električnim pogonom i baterijskim sklopom. Materijal šasije je kompozit od poliesterske matrice ojačane staklenim višesmjerno usmjerenim vlaknima te ugljkovim jednosmjernim vlaknima. Cijeli model izrađen se SCRIMP postupkom (eng. *Seeman Composite Resin Infusion Moulding Process*) što je vrsta podtlačnog ulijevanja. Ovim modelom analizirana su udarna svojstva kompozitne konstrukcije odnosno sposobnost upijanja energije sudara. Zaključeno je da je velika prednost kompozitne konstrukcije što ju je moguće oblikovati tako da se energija udara usmjerava u željene smjerove odnosno konstrukcija se deformira i kolabira na željeni način. [20]



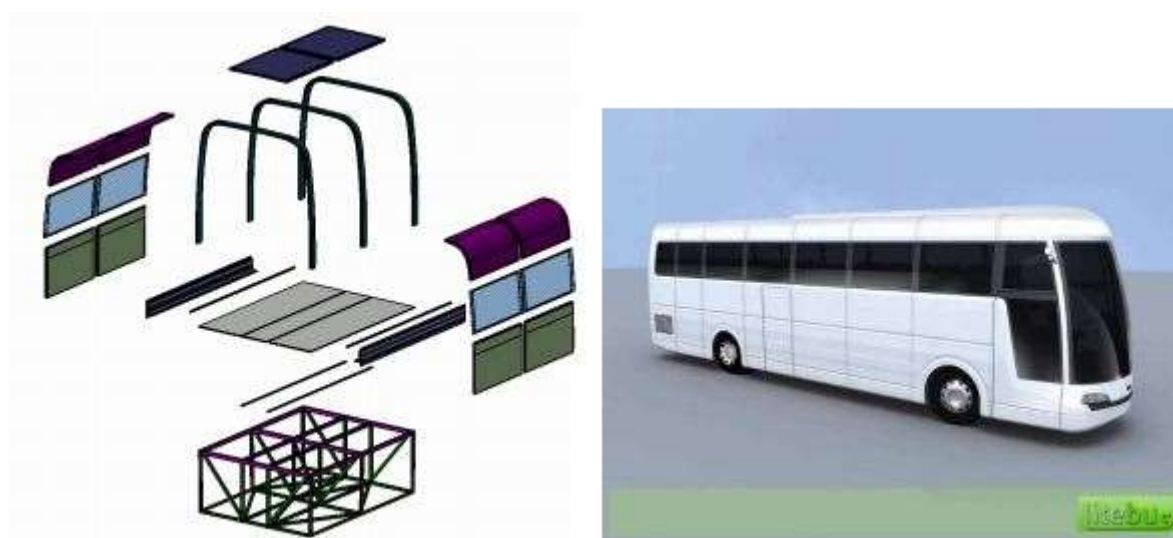
Slika 3.5. Završena monocoque samonosiva šasija modela *Catalyst* od proizvođača *Proterra* [20]



Slika 3.6. Proizvodnja gornjeg dijela šasije SCRIMP postupkom [20]

Zanimljiv primjer razvoja novih koncepata nosive konstrukcije autobusa je projekt *LITE bus* i projekt *FEUP bus*. Ciljevi ovih projekata su odgovoriti na poznate zahtjeve za gradske autobuse (manja masa, bolja učinkovitost...) putem nove samonosive šasije iz kompozitnog materijala. [21]

U projektu *LITE bus* cilj je bio razviti sendvič konstrukcije koje bi mogle preuzeti opterećenje "klasične" konstrukcije čelične šasije. Također se nastojalo razviti nove, vlaknima ojačane, profile koji bi bili proizvedeni pultrudiranjem. Slika 3.7 prikazuje elemente koji su napravljeni iz kompozitnih materijala te konceptualni model autobusa.



Slika 3.7. Projekt *LITE bus* dijelovi i struktura te koncept vozila [22]

Na slici 3.7 vidimo da je donji dio rešetkasta konstrukcija (obilježje integriranog dizajna), a gornji dio se sastoji od poprečnih nosača, krovnih i bočnih panela te nosivog podnog sendvič panela.

Projekt *FEUP bus* je također razvijao koncept nosive konstrukcije autobusa, a nakon FEM analize rješenja uočeno je da je inicijalno zamišljena konstrukcija nedovoljno kruta pa je razvijen profil za bočne nosače (eng. *pillars*) kojim su postignuta zadovoljavajuća mehanička svojstva (krutost). Profil je zapravo sendvič konstrukcija od pravokutnih profila od staklenih vlakana izrađenih namotavanjem oko spužvaste jezgre i laminata od staklenih vlakana (slika 3.8). [21]





Slika 3.8. Presjek profila upotrebljavanog za dobivanje krutosti konstrukcije u projektu *FEUP bus* [21]

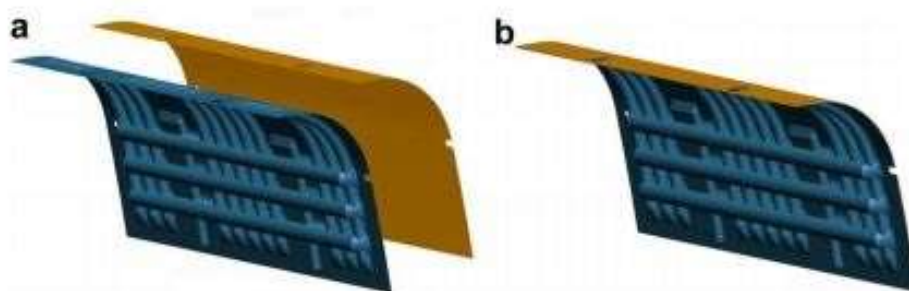
Razvoj gradskih autobusa, ali i vozila u širem smislu, podrazumijeva i smanjenje troškova i vremena, a što je moguće postići modularnom konstrukcijom proizvoda. Takav pristup ima tvrtka *Scania* koja je 2019. predstavila koncept *Scania NXT* modularni električni autobus u kojem primjenjuje kompozite tvrtke *Marstrom Composites* (slika 3.9). Radi se o bočnim i podnim panelim te kompozitnom kućištu pogonskog sklopa na prednjoj i stražnjoj osovini. Kompozit je ojačan ugljikovim vlaknima u obliku preprega. [23]



Slika 3.9 *Scania NXT* modularni električni autobus [23]

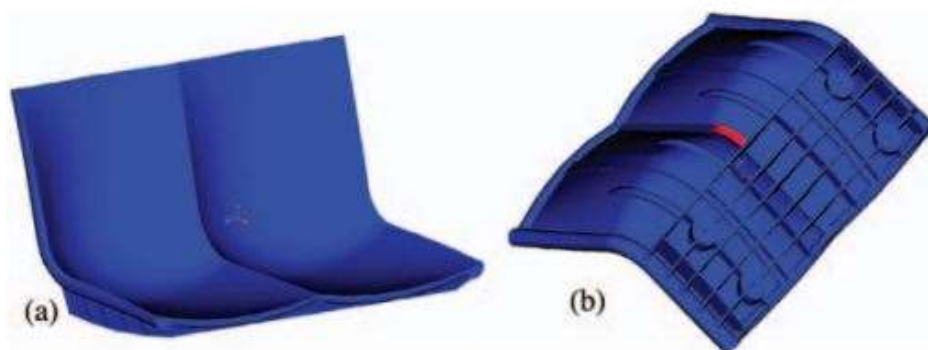
### 3.2. Primjena kompozitnih materijala u ostalim elementima vozila

Raznovrsnošću svojstava kompoziti su zanimljivi i kod slučajeva kada je moguće zamijeniti elemente vozila zadržavajući njihovu funkciju a ostvariti gubitak na ukupnoj masi vozila. Tako je primjena kompozita česta za dijelove unutrašnjosti vozila poput maski vozačkog dijela, ručki i sjedala ili poklopaca i polica putničkog prostora. Dobar primjer uštede od čak 39 % naspram postojećeg aluminijskog poklopca je kompozitno rješenje za vrata krovnog dijela na gradskom autobusu. Pri izradi su primjenjivana dva sloja, vanjski izrađen od poliolefinskog materijala (tzv. TPO, mješavina polipropilena, polietilena i ojačavajućih punila) te unutarnji dio od plastomerne matrice ojačane kratkim staklenim vlaknima (slika 3.10 a)). Postignuti efekt je bio moguć zahvaljujući gustoći staklene tkanine od samo  $560 \text{ kg/m}^3$ . [24]



Slika 3.10 Poklopac vrata krovnog prostora od dva sloja a) spojenih u cjelinu [24]

Sjedalo za gradski autobus (slika 3.11) razvijeno od kompozita ojačanog dugim vlaknima omogućava uštedu od 43 % u masi cijelog sklopa u odnosu na konvencionalno sjedalo koje je imalo čeličnu strukturu kao nosač. Proizvod je napravljen od TPO matrice ojačane E staklenim vlaknima. [25]



Slika 3.11 Sjedalo gradskog autobusa od kompozita ojačanog E staklenim vlaknima [15]

## 4. POSTUPCI PRERADE KOMPOZITNIH MATERIJALA

Zadnjih nekoliko desetljeća razvoja kompozitnih materijala definiralo je nekoliko postupaka izrade i prerade kompozitnih materijala kojima dolazi do izražaja kvaliteta ili ekonomičnost proizvoda. Glavni izazovi primjene kompozitnih materijala bili su upravo njihova upotrebljivost obzirom na mehaničku otpornost, atmosfersku i kemijsku postojanost, ali i opravdanje njihove uporabe s ekonomskog aspekta. [26]

### 4.1. Postupak ručnog dodirnog laminiranja (eng. *Lay up moulding*)

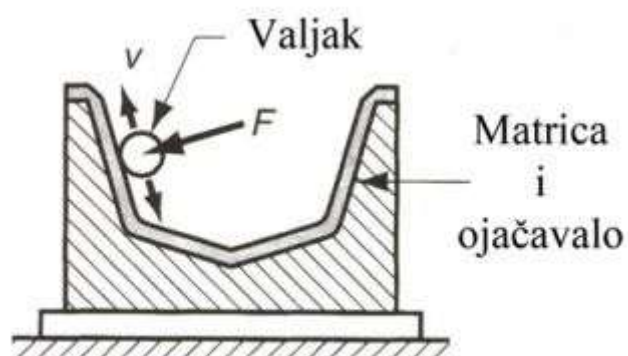
Postupak ručnog laminiranja je stvaranje kompozita nanošenjem slojeva ojačavala te impregniranjem slojeva ojačavala pomoću ručnog alata. Kalup za izradu proizvoda je otvoren, odnosno jednodijelan, te se najčešće izrađuje od drveta ili polimernog materijala. U postupku je moguće primjenjivati gotovo sve vrste materijala matrice i ojačavala, a cilj postupka je izraditi proizvod sa što manjim udjelom materijala matrice (smole) u ukupnom materijalu. Prednosti postupka su njegova jednostavnost, niski troškovi izrade alata, široki raspon materijala koje je moguće uporabiti te mogućnost izrade složenijih oblika (zakrivljenih površina) i veličina. Nedostaci postupka su činjenica da kvaliteta izrade uvelike ovisi o vještini radnika, potreba za radnom snagom prilikom izrade većeg broja izradaka ili izradaka većih dimenzija, vremensko ograničenje za izradu (otvoreno radno vrijeme smole može predstavljati problem kod izrade složenih, velikih komada) te zagrijavanje materijala i kalupa tijekom procesa umreživanja (razvijene temperature polireakcije umreživanja mogu doseći 110 °C). [5]

Postupak možemo podijeliti u nekoliko faza: [5]

1. Priprema kalupa sastoji se od čišćenja kalupa (najčešće acetonom) te nanošenje sloja odvajala. Odvajalo se nanosi na sve površine koje su u dodiru sa smolom, ali poželjno je nanijeti odvajalo i na sve površine i bridove u neposrednoj blizini rubova kalupa.
2. Nakon što odvajalo očvrstne površina kalupa se obrađuje ručnim poliranjem. Ovime se postiže dobro tečenje smole te kvaliteta površine izradka. Nanošenje odvajala potrebno je, po potrebi, ponoviti 2 do 3 puta. Nakon što je površina kalupa glatka kalup je pripremljen za laminiranje.
3. Materijal matrice potrebno je iskrojiti prema potrebnim dimenzijama i obliku izradka.
4. Priprema smole sastoji se od procjene potrebne mase (vaganjem) te preciznog miješanja sa katalizatorom reakcije umreživanja. Udio komponenti (smola i katalizator) izražen je

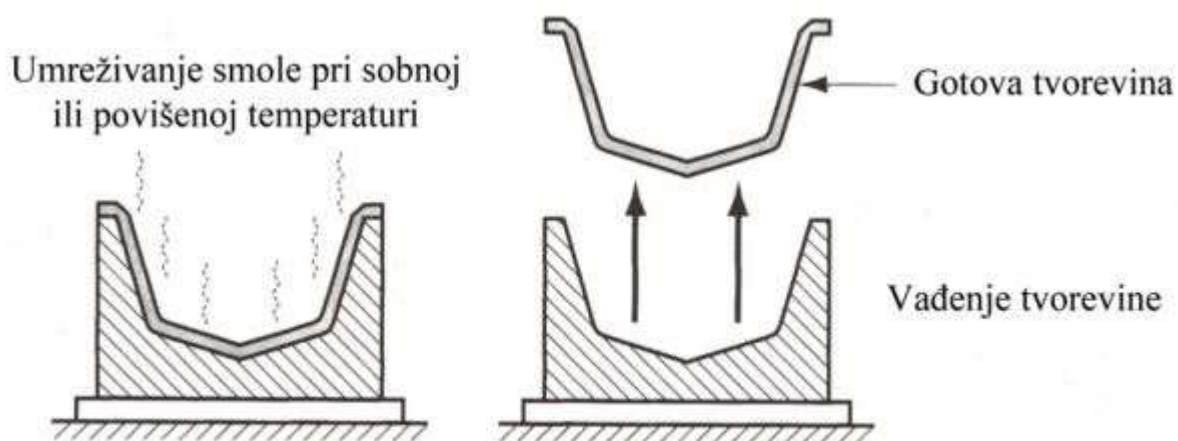
u postotnom masenom udjelu, propisan od strane proizvođača te ovisi o okolišnoj temperaturi, no najčešće se kreće od 1 do 3 %.

- Laminiranje započinje postavljanjem prvog sloja ojačavala, te natapanjem, potom naizmjeničnim polaganjem slojeva i natapanjem smolom. Kvaliteta izrade ovisi o tehnici natapanja (ručnim postupkom istiskivanja zraka te valjanjem valjaka za odvajanje zraka i viška smole iz materijala, prikazano na slici 4.1).



Slika 4.1. Postupak odvajanja zraka i viška smole [5]

- Nakon umreživanja proizvod se vadi iz kalupa (slika 4.2).

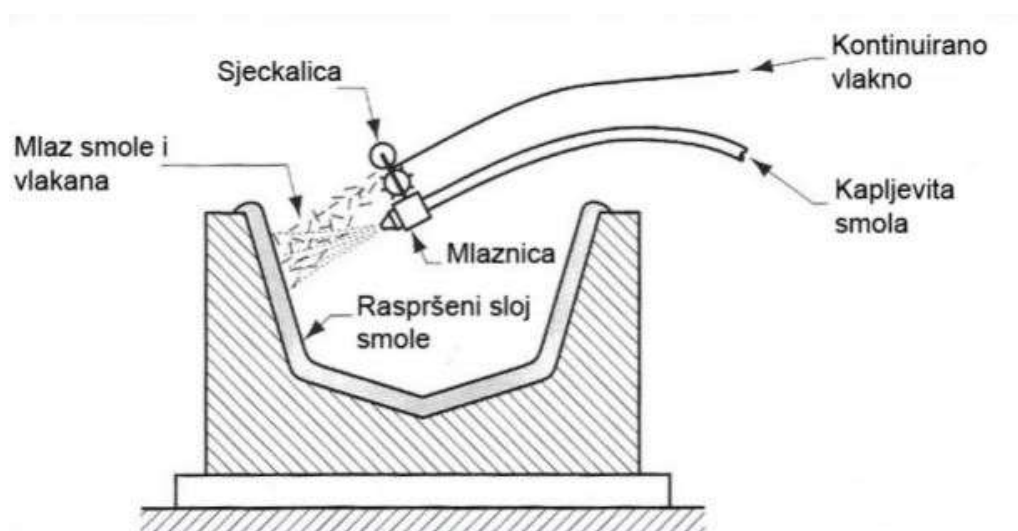


Slika 4.2. Umreživanje i vađenje kompozita iz kalupa [5]

U postupku ručnog laminiranja moguće je primjeniti i posebnu gelnu prevlaku (tzv. *gelcoat*) u svrhu postizanja bolje kvalitete površine izradka. To je posebna vrsta poliesterske smole koja se na kalup nanosi principom “mokra na mokro” kroz nekoliko tankih slojeva, potom se pričekava da gelna prevlaka umreži te se nastavlja sa nanošenjem slojeva ojačavala i matrice. Ovime se dobiva glatka površina s vanjske strane proizvoda. Vrlo česta primjena prevlake, često nazivanog temeljnim premazom, je u brodogradnji. [5]

#### 4.2. Dodirni postupak sa štrcanjem (eng. *Spray up moulding*)

Dugotrajan postupak ručnog laminiranja moguće je skratiti djelomičnom automatizacijom promjenom načina unošenja smole i ojačavala. Kod dodirnog postupka sa štrcanjem (slika 4.3.) ojačavalo se ne nanosi u obliku tkanine ili mata već se kontinuirano vlakno povlači u sjekalicu pištolja za naštrcavanje te se pomoću stlačenog zraka nanosi na kalup u mješavini sa smolom. Pištolj za naštrcavanje ima dvoje mlaznice za smolu budući da se smola do pištolja dovodi iz dva odvojena spremnika, jednog u kojem je pomiješana s umreživalom te drugom u kojem je pomiješana s katalizatorom. Zrak se i dalje mora ručno istiskivati iz materijala no ovim postupkom je skraćeno vrijeme izrade te donekle smanjena potreba za radnicima, s druge strane nedostatak postupka je isključivi izbor ojačavala budući da se u postupku upotrebljavaju samo staklena vlakna. [5]



Slika 4.3. Dodirni postupak naštrcavanjem[5]

Prednosti ovog postupka su ekonomičnost pri izradi većih izradaka, uporaba jeftinijih materijala, jednostavnost izrade kalupa i brzina postupka. [5]

Posljedica ograničenja u kontroli količine smole, odnosno ukupno naštrcanog materijala je da umreženi materijal ima veći udio smole te debljina sloja materijala nije jednolična. Ograničena mehanička svojstva zbog primjene samo diskontinuiranih staklenih vlakana je također jedan od nedostataka ovog postupka. Unutarnja površina izradka je lošije kvalitete, no u postupku je moguće primjeniti druge materijale kao punilo (izrada laminata sa drvenim ili polimernim punilom). U transportnoj industriji ovaj postupak se najčešće primjenjuje za izradu bočnih panela autobusa, velikih poklopaca i pregrada.

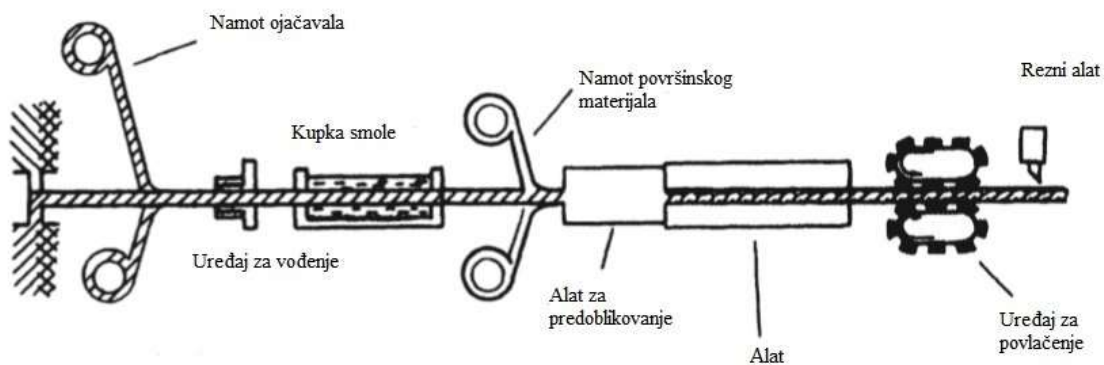
### **4.3. Pultrudiranje (eng. *Pultrusion*)**

Pultrudiranje je proizvodni postupak koji se najčešće primjenjuje za izradu profila konstantnog presjeka. Takvi profili su u transportnoj industriji vrlo često ugrađivani u strukturne dijelove vozila, a njihovim spajanjem se izrađuju nosači i razne rešetkaste konstrukcije. Materijali koji se upotrebljavaju u komercijalnim primjenama su poliesterske i vinilesterske smole, rjeđe epoksidne smole budući da imaju duže vrijeme umreživanja te se teže odvajaju od kalupa. Kao ojačavala se mogu primjeniti praktički svi materijali, a njihovim položajem se ograničavaju mehanička svojstva proizvoda. Ovim postupkom dobivaju se izrazito anizotropni materijali, no svojstva okomito na uzdužnu os mogu se poboljšavati dodavanjem materijala u obliku mata kao prvi unutarnji i vanjski sloj kompozita. [26]

Postupak se izvodi na liniji za pultrudiranje (slika 4.4) koji čine namoti materijala, profilirani alat (funkcija jednog dijela kalupa), uređaja za vođenje, kupke sa smolom, namota materijala površinskog sloja, uređaja za praoblikovanja, grijanog kalupa, sustava povlačnih valjaka te reznog alata za odvajanje konačnog proizvoda. [26]

Cijeli postupak možemo promatrati kroz 4 faze: pozicioniranje (poravnavanje) ojačavala te impregnacija smolom, oblikovanje i umreživanje u kalupu, povlačenje i na kraju rezanje na željenu dužinu. [26, 27]

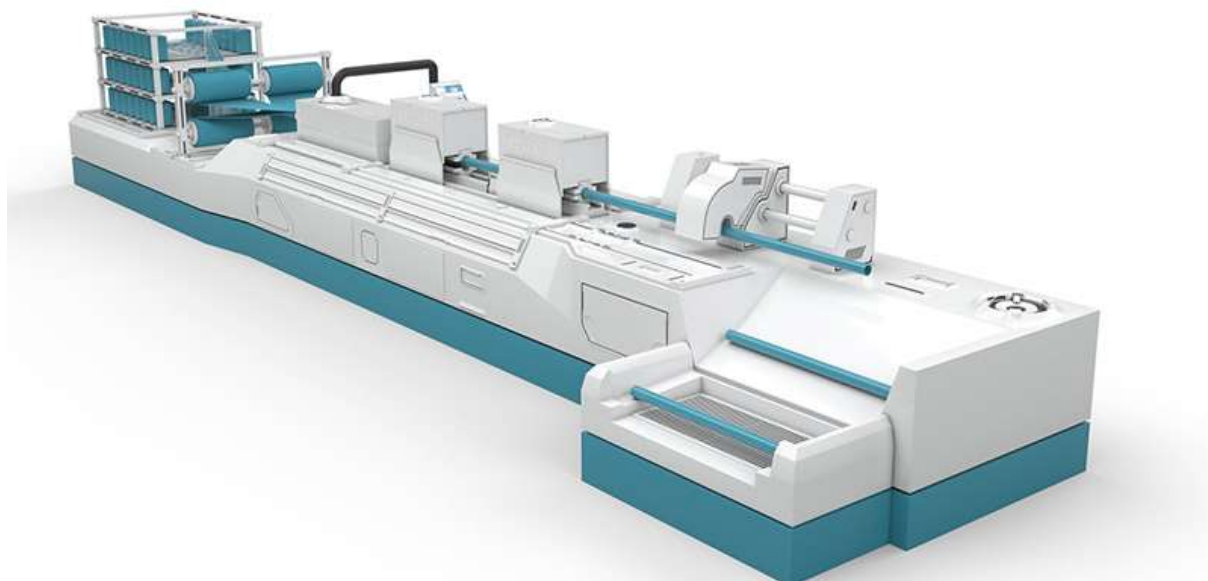




Slika 4.4. Shema postupka pultrudiranja [26]

Kupka smole sadrži smolu, katalizator umreživanja, boju te aditive za poboljšanje postojanosti na UV zračenje i visoke temperature. Viskoznost smole, vrijeme koje vlakno provede u kupci te nategnutost vlakna utječu na razinu natopljenosti vlakna smolom i predmet su razvoja pojedinih proizvođača strojeva za pultrudiranje, upravo o ovom dijelu postupka, odnosno natopljenosti struka vlakana, ovise mehanička svojstva krajnjeg proizvoda. Površinski materijal se nanosi sa svrhom poboljšanja kvalitete površine profila, a nakon što je nanesen uređaj za preoblikovanje osigurava planirani raspored vlakana u profile, odstranjuje višak smole te ga priprema za završno oblikovanje u grijanom kalupu. Parametri poput temperature, dužine kalupa te brzine povlačenja pomno su odabrani kako bi smola u kalupu potpuno umrežila. Ovisno o složenosti profila, viskoznosti smole te režimu umreživanja brzina povlačenja u procesima pultrudiranja varira od 50 mm/min do 4,5 m/min. [26]

Na slici 4.5 prikazana je suvremena linija za pultrudiranje proizvođača *EXEL*.



Slika 4.5. Suvremena linija za pultrudiranje tvrtke EXEL Composites [27]

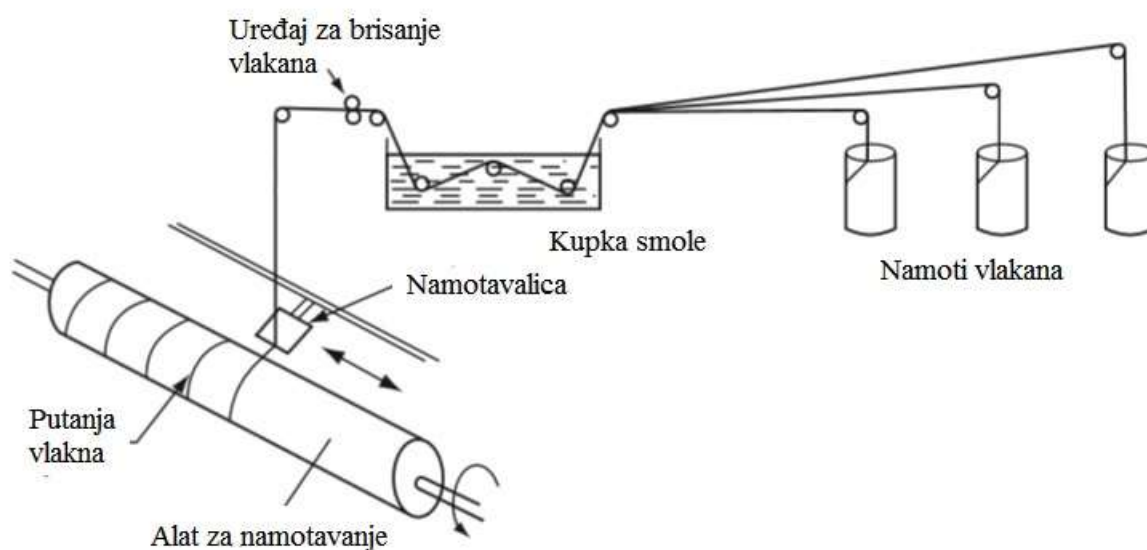
Prednosti ovog postupka su kontinuirana izrada (pogodno za velikoserijsku proizvodnju), neograničena duljina profila, dobra mehanička svojstva duž uzdužne osi (udio vlakana i do 70 %), dobra kemijska i UV postojanost i dimenzijska stabilnost. Nedostaci su velika ulaganja u alat, ograničenja dimenzija i mehaničkih svojstava u poprečnom smjeru. [5]

#### 4.4. Namotavanje filameta (eng. *Filament winding*)

Namotavanje je proizvodni postupak za izradu šupljih osnosimetričnih kompozitnih proizvoda. Uređaj za namotavanje (slika 4.6) sastoji se od namota vlakna, kupke smole, uređaja za brisanje vlakana te pomične namotavalice i alata (jezgre). Kupka smole sadrži smolu, katalizator te dodatke (pigmente, aditive za kemijsku postojanost), a uređaj za brisanje vlakana služi za uklanjanje viška smole s niti vlakna te osiguravanje dimenzije pojedinog natopljenog vlakna. Ovu funkciju najčešće obavlja par valjaka kroz koje se vlakno provlači no postoje i izvedbe sa čeličnim češljem. Alat čini tijelo željenog oblika na koje se namata struno natopljenih vlakana, alat rotira, a namotavalica uzdužnim pomicanjem pozicionira kontinuirano vlakno na alat. Kombinacijom brzine potezanja vlakna i gibanja namotavalice ostvaruje se željeni uzorak vlakana a time i svojstva konačnog materijala. [5,26]

Jezgra se nakon umreživanja rastavlja te se gotovi proizvod odvaja od alata. [5,26]





Slika 4.6. Shema postupka namotavanja [26]

Mehanička svojstva proizvoda dobivenog ovim postupkom uvelike ovise o parametrima i načinu namotavanja (slika 4.3). Kut pod kojim vlakno izlazi iz namotavalice prema alatu naziva se kut namotavanja te varira od  $0^\circ$  (prstenasto namotavanje) do  $90^\circ$  (namotavanje paralelno s osi jezgre), a definira se brzinom rotacije jezgre i pomaka namotavalice prema [26] izrazom:

$$\theta = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_j \cdot R_j}{v_n} \quad (4)$$

Gdje su:

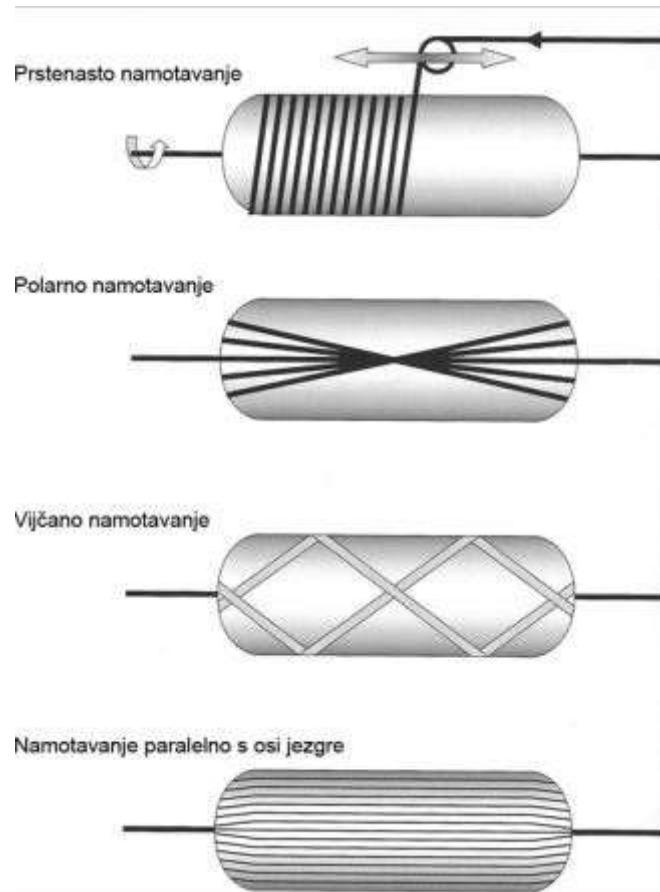
$n_j$  – broj okretaja jezgre [ $\text{min}^{-1}$ ]

$R_j$  – polumjer jezgre [m]

$v_n$  – brzina gibanja namotavalice [m/s]

Poseban slučaj je polarno namatanje kod kojeg namotavalica rotira oko nepomične jezgre. Prednosti namotavanja filameta su ekonomičnost postupka, mogućnost regulacije udjela smole, jeftiniji materijal (vlakno nije u formi tkanine ili mata) te postizanje odličnih mehaničkih svojstava ovisno o djelovanju opterećenja (vlakna je moguće postaviti u cirkularnom smjeru gdje su naprezanja materijala spremnika najviša). Nedostatak postupka je relativno visok trošak

izrade jezgre (pogotovo kod višedjelnih jezgri za izradu velikih dijelova), ograničenost oblika proizvoda te loš estetski izgled vanjske površine proizvoda. [5,26]



Slika 4.7. Načini namotavanja vlakna na jezgru [5]

#### 4.5. Povlačno namotavanje filameta (eng. *Pullwinding*)

Postupak koji suštinski kombinira principe prethodna dva omogućuje izradu profiliranih proizvoda s poboljšanim mehaničkim svojstvima u transverzalnom smjeru. Profil dobiven

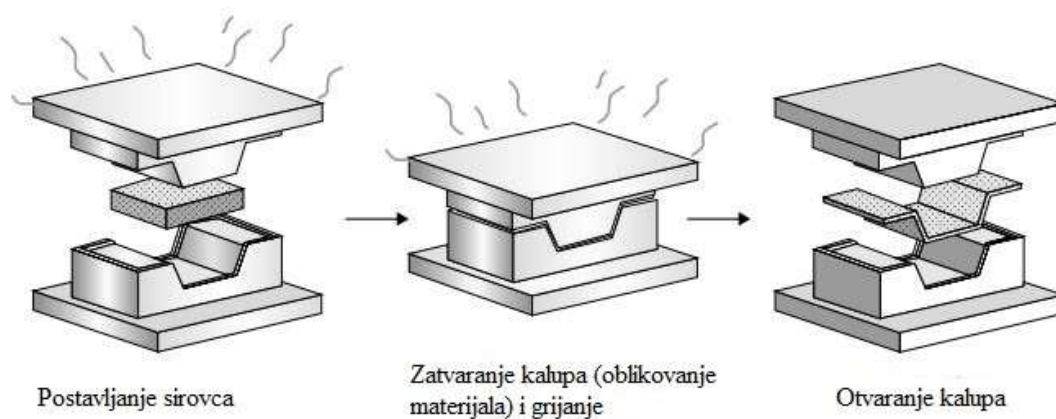


Slika 4.8. Princip *pullwinding* postupka tvrtke EXEL [27]

pultrudiranjm služi kao jezgra za namatanje vlakana. Na slici 4.8 prikazan je princip pull-winding postupka proizvođača *EXEL*. [27]

#### 4.6. Izravno prešanje (eng *Compression moulding*)

Vrlo često primjenjivan postupak za izradu dijelova gospodarskih vozila (maske) je izravno prešanje. Postupkom se u dvodijelnom kalupu stvara visoki tlak te oblikuje proizvod. Razlikujemo toplo i hladno izravno prešanje. Kod hladnog izravnog prešanja se u kalup postavlja ojačavalo ismola te zatvara kalupa u kojem se tlakom oblikuje proizvod prema željenom obliku i dimenzijama. Umreživanje se u ovom slučaju odvija pri temperaturi okoline. Izravno toplo prešanje (Slika 4.9.) je postupak pri kojem se u kalup stavlja sirovac u obliku preprega (SMC-Sheet Mold Compound prikazan na slici 4.5) ili komada predpripremljene mase (BMC- Bulk Mold Compound na slici 4.4), koji se zatvaranjem i zagrijavanjem kalupa oblikuju u zahtjevani oblik i dimenzije. Ovakvi pripremljeni materijali mogu biti u različitim kombinacijama matrice i ojačavala, no razlikuju se u duljini vlakana (BMC ima kratka diskontinuirana vlakna). Zbog razlike u duljini vlakana SMC materijal omogućuje da završni proizvod ima višu čvrstoću.



Slika 4.9. Postupak izravnog toplog prešanja [28]

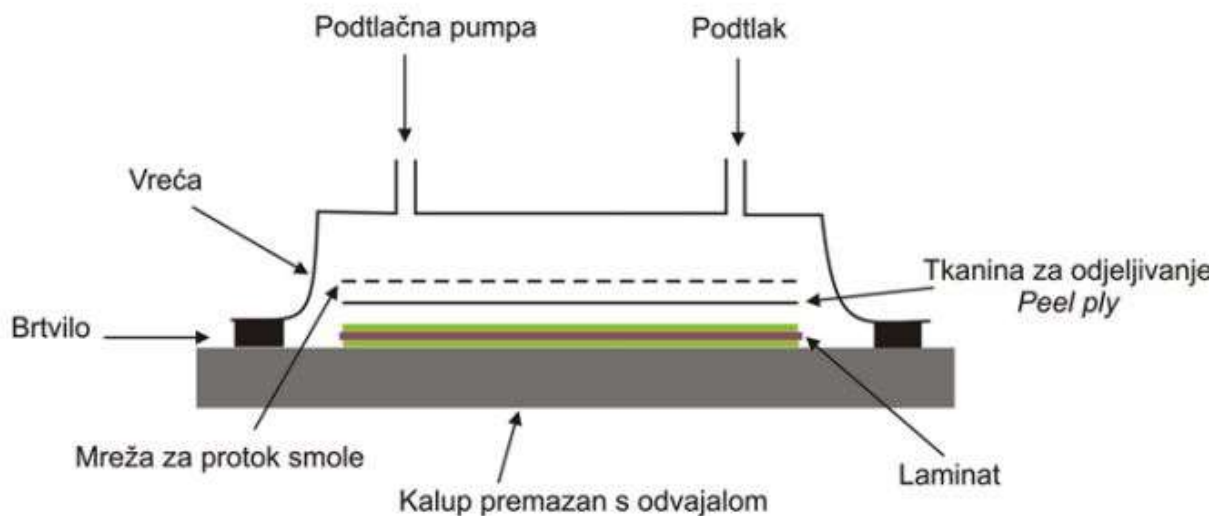
Slika 4.10. BMC sirovac proizvođača *HAM Composites* [29]Slika 4.11. SMC sirovac proizvođača *HAM Composites* [29]

#### 4.7. Podtlačno ulijevanje (eng. *Resin infusion*)

Postupak kojim se pomoću podtlaka natapa ojačavalo naziva se podtlačno ulijevanje (slika 4.12). Kalup je otvoren te se u njega postavljaju suha vlakna. Na njih se stavlja pokrovna folija koja mora biti dobro zabrtvljena duž rubova i uglova kalupa. Podtlačnom pumpom se odstranjuje zrak te ispunjava kalupni prostor smolom. Smola teče kroz posebna perforirana ili spiralna crijeva koja se postavljaju zbog boljeg popunjavanja kalupa, a time i natapanja vlakana. Nakon što je kompozit potpuno natopljen smolom dovod smole se prekida, a podtlak se održava do umreživanja kako bi se višak smole što više uklonio iz kompozita u spremnik za višak smole.

Uglavnom se primjenjuju epoksidne i fenolne smole, a poliesterske smole se izbjegavaju zbog povećane emisije štetnog stirena. Sve vrste ojačavala mogu se primjeniti u ovom postupku, a u izradi laminata često se upotrebljavaju ispune od PVC ili prirodnog materijala (balza). [5]

Na slojeve ojačavala postavlja se tkanina za odjeljivanje (eng. *peel ply*), to je komad gusto pletenog poliamida impregniranog odvajalom, a upotrebljava se kod zahtjeva za kvalitetnom površinom proizvoda. Na tkaninu za odjeljivanje postavlja se još mrežica za bolje provođenje smole. [5]



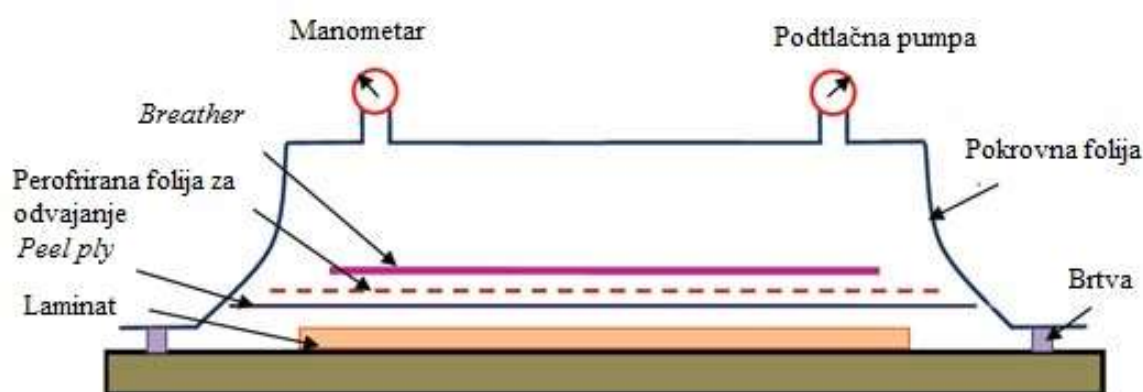
Slika 4.12. Postupak podtlačnog ulijevanja [5]

Prednosti podtlačnog ulijevanja su mogućnost izrade proizvoda s većim udjelom vlakana, bolje natapanje vlakana te protok smole zbog djelovanja tlaka (smanjena mogućnost nastanka dijelova koji nisu natpoljeni smolom), a emisija štetnih tvari koje hlape tijekom umreživanja u okoliš je smanjena. [5]

Nedostaci ovog postupka su relativno veći troškovi opreme za izradu, potreba za zbrinjavanjem dijela opreme (iskorištena crijeva i folija), potrebna je pedantnost i vještina radnika (brtvljenje folije je ključno za održavanje podtlaka tijekom cijelog procesa) te zagrijavanje uslijed umreživanja kojem je izložen dio alata.[5]

#### 4.8. Podtlačno oblikovanje vrećom (eng. *Vacuum bagging*)

Podtlačno oblikovanje vrećom je postupak kod kojeg se u kalup postavljaju vlakna natopljena smolom, odnosno za razliku od podtlačnog ulijevanja ovdje su vlakna mokra, smola se dakle ne unosi već se podtlakom samo višak smole izvlači iz kompozita. Kalup je također jednodijelan, otvorenog tipa, a postupak izrade je sličan ručnom laminiranju. Nakon pripreme kalupa (čišćenja te premazivanja odvajalom) u kalup se postavljaju vlakna koja se ručno natapaju smolom. Postupak se ponavlja do željene debljine, odnosno konfiguracije kompozita te se na zadnji sloj vlakana postavlja tkanina za odjeljivanje (eng. *peel ply*), na koju se stavlja tkanina za upijanje viška smole (eng. *breather*). Potom se na kalup postavlja pokrovna folija na koju je potrebno postaviti ventil za izvlačenje viška smole i zraka. Nakon brtvljenja pokrovne folije pomoću fleksibilnih crijeva kalup se spaja s podtlačnom pumpom koja osigurava podtlak tijekom cijelog vremena umreživanja smole. [5][30]



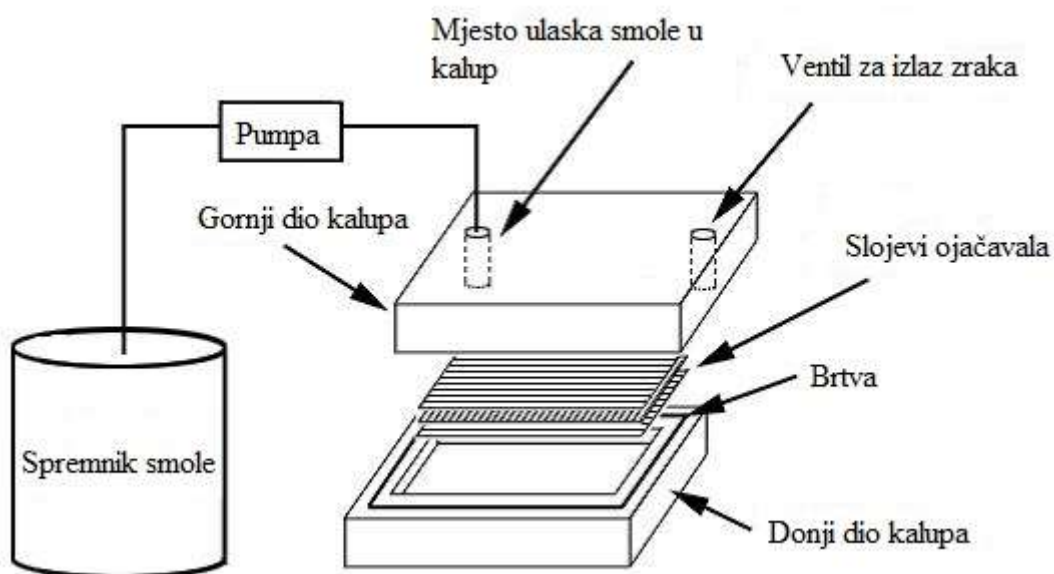
Slika 4.13. Podtlačno oblikovanje vrećom [5]

Budući da je postupak kombinacija ručnog laminiranja i podtlačnog oblikovanja možemo reći su mu prednosti jednostavnost izrade te niski troškovi alata, mogućnost ostvarivanja velikog udjela vlakana u materijalu (posljedično dobra mehanička svojstva) te mogućnost izrade složenih oblika proizvoda.[5, 30]

Nedostatak ovog postupka je potreba za opremom te naknadno zbrinjavanje iskorištenih folija, osjetljivost na kvalitetu izrade postava (potrebno je osigurati brtvljenje elemenata) i ograničenost primjene na nekoliko primjeraka proizvoda (postupak nije pogodan za velikoserijsku proizvodnju).[5, 30]

#### 4.9. Postupak injekcijskog-posrednog prešanja kapljevite smole s umetnutim trodimenzionalnim ojačavajućim predoblikom (eng. *Resin Transfer Moulding*)

Postupak injekcijskog posrednog prešanja kapljevite smole s umetnutim trodimenzionalnim ojačavajućim predoblikom kombinira postupak izravnog prešanja i injekcijskog prešanja polimera. Prema slici XY u u dvodijelni kalup se postavljaju ojačavala u željenoj konfiguraciji, potom se kalup zatvara te se u kalup ubrizgava kapljevita smola koja je u spremniku povezana s umreživalom. Uslijed kompresije dijelova kalupa ojačavalo se oblikuje u željeni oblik i dimenzije, a tlakom pumpe za smolu se osigurava tečenje smole odnosno natapanje vlakana. Kalup se može i zagrijavati, no to ovisi o kemijskom sastavu smole. Za izradu složenijih dijelova u postupku se može primjeniti i podtlak pa nastaje varijanta nazvana eng. *Vacuum assisted resin transfer moulding*. U postupku je moguće primjeniti sve vrste smole i ojačavala. Ovim postupkom moguće je proizvesti proizvode dobre kvalitete površine (zbog dvodijelnog kalupa) te visokog udjela vlakana, no alat za ovakav postupak je težak i relativno skup. [5,31]

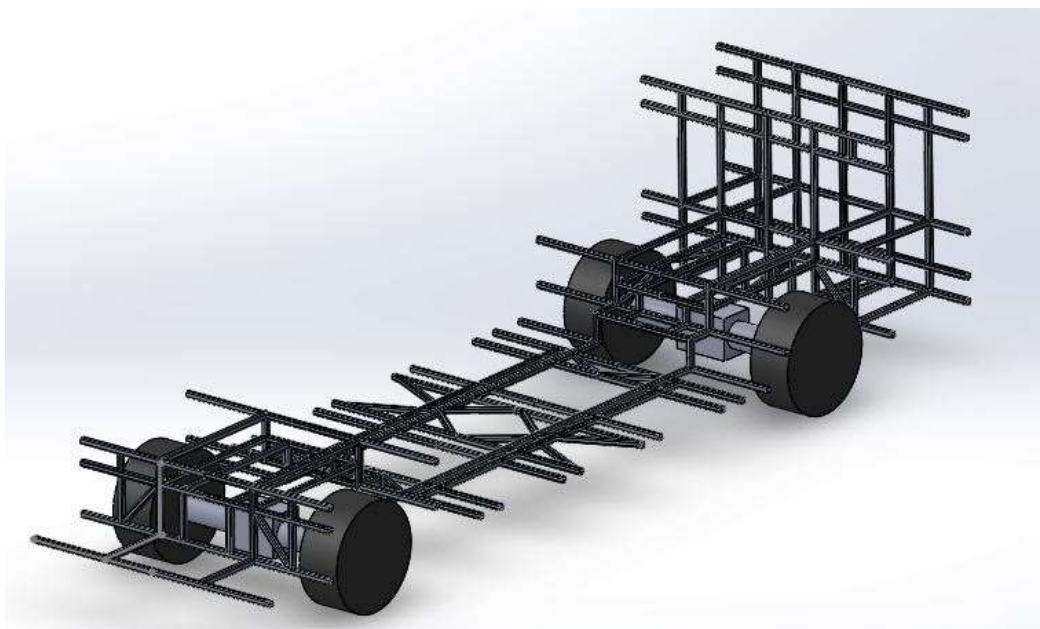


Slika 4.14. Postupak RTM [26]



## 5. PODNICA

Vozila za transport putnika se sastoje od nekoliko glavnih dijelova odnosno skupina elemenata. Nosiva konstrukcija osnova je strukture vozila te predstavlja početnu točku u razvoju vozila, a uz zahtjeve vezane za čvrstoću mora zadovoljavati i funkcionalne zahtjeve (adekvatan pristup prostoru, prostor za sve potrebne elemente i uređaje i slično). U 2. poglavlju su već spomenuti postojeći pristupi razradi arhitekture vozila za prijevoz putnika tj. autobusa. Razvoj suvremenih autobusa sve se češće svodi na modularni pristup dizajna cijelokupnog vozila što predstavlja izazov na oblikovanje šasije. Niskopodni električni autobusi već su niz godina prisutni na tržištu, a na slici 5.1 dan je prikaz karakterističnog, čestog rješenja oblikovanja rešetkastke konstrukcije niskopodnog električnog autobusa izrađenog iz čeličnih kvadratnih cijevi.



Slika 5.1. Rešetkasta konstrukcija suvremenog električnog autobusa

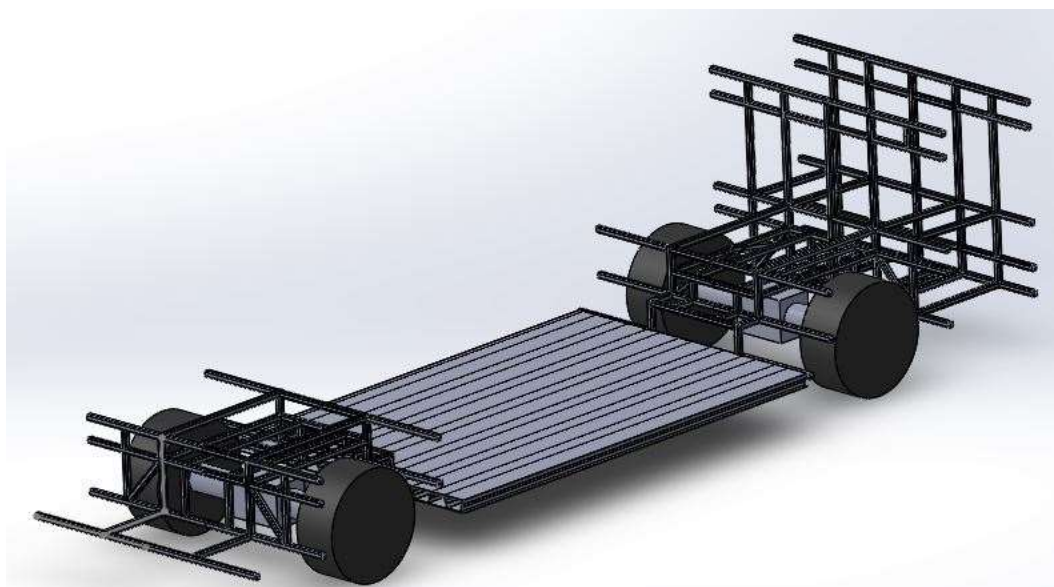
Ciljevi razvoja električnog autobusa najčešće se pokušavaju ostvariti smanjenjem mase vozila, a kompozitni materijali su se pokazali vrlo dobrim rješenjem za primjenu u tom slučaju.

Podnica vozila predviđena je za središnji dio vozila, odnosno dio u kojem se nalaze putnici, dok su pogonski i upravljački modul s prednje i stražnje strane. Prijedlog rješenja za podnicu vozila predstavljen u ovom radu bit će sastavljen od profila kompozitnog materijala (slika 5.2), no kako je u konceptualnoj fazi razvoja teško predvidjeti konačan izgled vozila u eksperimentalnom dijelu će se ispitivanjima pristupiti prema pretpostavci da na sredini profila



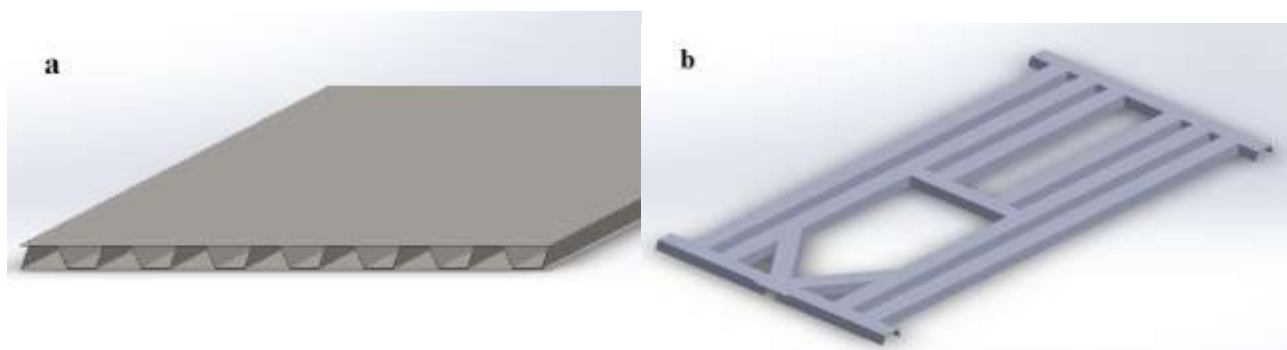
dužine 1500 mm stoji putnik mase 100 kg. Ovom pretpostavkom se uzima u obzir da konačne dimenzije i oblik podnice još nije poznate budući da nije poznato koji elementi vozila će biti postavljeni u predviđeni prostor za podnicu.

Ponašanje profila pod opterećenjem bit će analizirano grafičkim mjernim sustavom Titrop, a ispitna tijela izrezana iz profila standardiziranim metodama za određivanje rastezne čvrstoće, savojne čvrstoće i žilavosti. Metode ispitivanja će biti detaljnije opisane u nastavku.



Slika 5.2 Konceptualno rješenje podnice

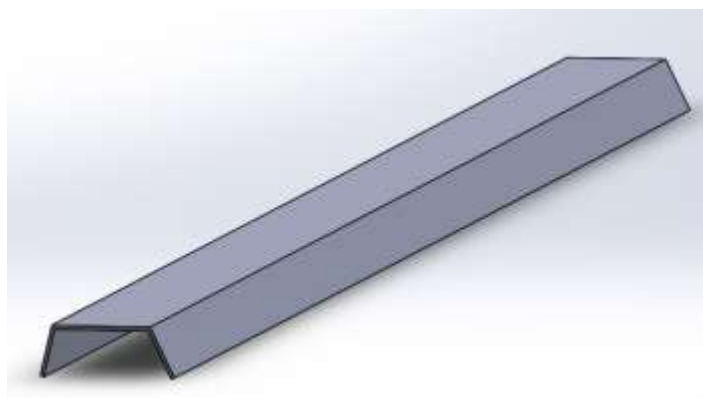
Prijedlog rješenja podnice detaljnije je prikazan na slici 5.3 a, dok je na 5.3,b prikazana mogućnost korištenja osnovnog profila (slika 6.3) kao gradivnog elementa strukture bez ploča.



Slika 5.3 Koncept podnice: a) struktura s pločama, b) rešetkasta konstrukcija

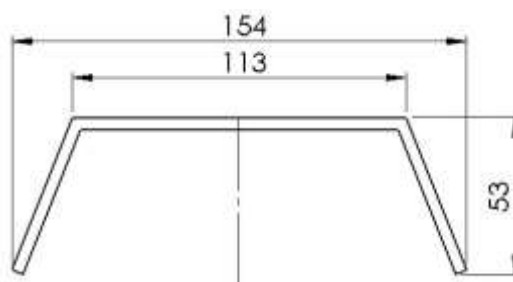
## 6. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu rada bit će opisana izrada tri profila elementa podnice. Za materijal profila podnice odabrane su tri vrste kompozitnog materijala s različitim strukturama ojačavala u matrici. Za materijal matrice odabrana je poliesterska smola zbog zadovoljavajućih mehaničkih svojstava naspram cijene, te dobre povezljivosti sa odabranim materijalom ojačavala. Ojačavalo će biti stakleno vlakno u obliku mata i tkanine te ugljično vlakno u formi tkanine. Materijali ojačavala odabrani su zbog dobrih mehaničkih svojstava u odnosu na masu i cijenu. Ponašanje profila pod opterećenjem bit će analizirano grafičkim mjernim sustavom *Titrop* jer ova metoda omogućava praktično ispitivanje ponašanja objekata većih dimenzija pod opterećenjem. Iz profila će se izrezati ispitna tijela na kojima će se ispitati rastezna i savojna svojstva materijala te žilavost. Metode ispitivanja će biti detaljnije opisane u nastavku.



Slika 6.1 Model elementa (profila) podnice

Geometrijske karakteristike profila koji će se izraditi prikazane su na slici 6.2. profil će se izraditi u duljini od 2000 mm jer će se iz profila izrezati ispitna tijela za drugi dio ispitivanja. Profil kalupa debljine 3 mm za izradu profila prikazan je na slici 6.2. Debljina profila određena je iskustveno i zbog što manje mase vozila.



Slika 6.2 Poprečni presjek kalupa za izradu

## 6.1. Izrada profila

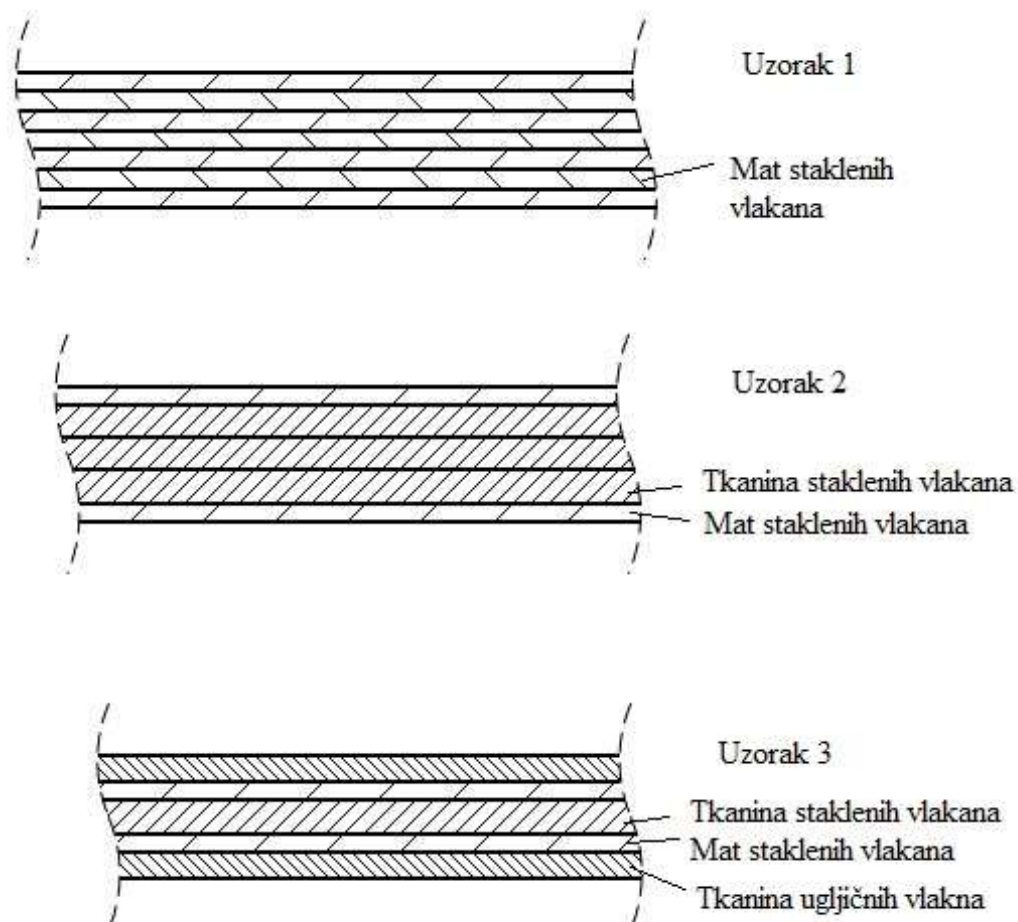
Profili podnice izrađeni su postupkom ručnog laminiranja. Ručno laminiranje odabrano je zbog jednostavnosti, praktičnosti i brzine izrade.

Kao matrica primjenjena je nezasićena poliesterska smola *POLYLITE 440-800* budući da ima zadovoljavajuća mehanička svojstva, svojstva postojanosti te odgovarajuću cijenu. Odabrana smola je viskozna tekućina karakterističnog mirisa te se aktivira miješanjem sa katalizatorom u omjeru od 1 do 3 %. Ojačavalo je u obliku tkanine i mata čime će se dobiti kombinacija doprinosa anizotropnosti i izotropnosti mehaničkih svojstava, odnosno kompoziti će biti različitog tipa i materijala (slika 6.3.).

Primjenjeni stakleni mat ima debljinu od 0,6 mm, staklena tkanina 1 mm, a tkanina ugljičnih vlakana (200 g/m<sup>2</sup>)

Profili će biti izrađeni u tri varijante materijala:

- Profil 1, laminat staklenog mata (7 slojeva)
- Profil 2, laminat staklenog mata i triaksijalne tkanine 0/45/45 (2 sloja mata s vanjske strane i 3 sloja tkanine u sredini)
- Profil 3, laminat tkanine od ugljičnog vlakna, tkanine od staklenog vlakna te mata od staklenog vlakna (2 sloja ugljičnih vlakana s vanjskih strana, 2 sloja mata staklenih vlakana i 1 sloj tkanine staklenih vlakana u sredini)



Slika 6.3 Shema strukture izrađenih profila

Kao prvi sloj u strukturama profila 1 i 2 odabran je stakleni mat budući da je njime moguće postići bolju natopljenost vanjskih slojeva kompozita. Tkanina ugljičnih vlakana je odabrana kao prvi i zadnji sloj u profilu 3 jer je tijekom savijanja (a savijanje je dominantno opterećenje u ovom slučaju) raspodjela naprezanja po uzdužnom presjeku profila takva da će se na vanjskim i unutarnjim slojevima pojaviti naviša rastezna odnosno pritisna naprezanja.

Nakon čišćenja kalupa acetonom, krojenja ojačavala (rezanje na potrebne dimenzije), postupak nanošenja odvajala i poliranja kalupa ponovio se 2 puta (slika 6.4).



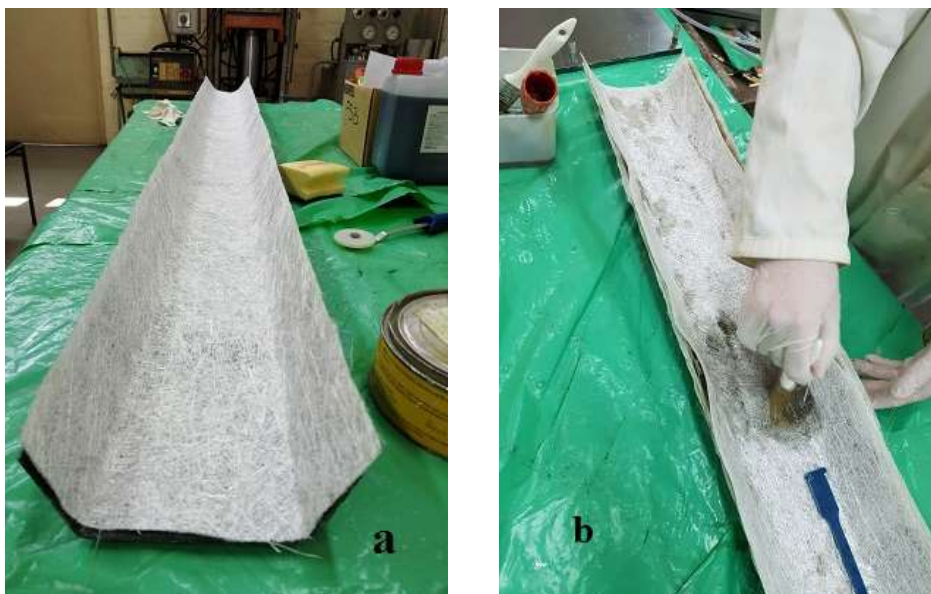
Slika 6.4 Nanošenje i poliranje odvajala

Poliesterska smola miješala se s katalizatorom u udjelu od 2 %. Kako bi precizno odredili potreban udio komponenata koristila se precizna laboratorijska vaga (slika 6.5). Otvoreno radno vrijeme primjenjene smole je 35 do 45 minuta.



Slika 6.5 Miješanje smole

Nakon postavljanja prvog sloja ojačavala kistom se nanosi smola te impregnira u vlakna kako bi se postigla što bolja natopljenost vlakana. Postupak utiskivanja kistom (slika 6.6) ključan je za istiskivanje zraka iz slojeva odnosno kvalitetu konačnog izradka. Tijekom izrade bilo je potrebno obratiti pozornost da mat bude dobro pozicioniran u uglovima kalupa, te na pomicanje idućih slojeva tijekom impregnacije (vidljivo na slici 5.6 b) i tijekom postavljanja svakog idućeg sloja.



Slika 6.6. Izrada prvog profila: a) slaganje mata u kalup i b) impregnacija smolom

Svaki sloj je nakon impregnacije kistom potrebno obraditi specijalnim valjkom za istiskivanje zraka i odvajanje viška smole (slika 6.7 a). Nakon posljednjeg sloja profil je ostavljen da umreži. Nakon umreživanja profil 1 je izvađen iz kalupa (slika 6.7 b).





Slika 6.7. Prerada kompozita: a) istiskivanje zraka, b) vađenje gotovog profila iz kalupa

Postupak izrade profila 2 analogan je izradi profila 1, osim što je upotrebljavana tkanina staklenih vlakna (sukladno prethodno prikazanoj shemi strukture profila).

Izrada profila 3 započela je krojenjem tkanine ugljičnih vlakana te ostalih slojeva na potrebne dimenzije i pripremom kalupa analogno postupcima za izradu profila 1 i 2. Krojenje tkanine ugljičnih vlakana zahtijevalo je pozornost obzirom da su se strukovi tkanja vrlo lako rasplitali. Za izradu profila 3 se također primjenila poliesterska smola sa istim udjelom katalizatora (2 %). Tkanina ugljičnih vlakana pokazala se najboljom u popunjavanju uglova kalupa no impregnacija smolom je bila otežana (impregnacija prvog sloja prikazana je na slici 6.8)



Slika 6.8. Impregnacija prvog sloja profila 3

Nakon postavljanja drugog sloja (stakleni mat) postupak ručnog laminiranja bio je analogan kao i kod izrade profila 1 i 2. Impregnacija kistom i valjanje valjkom prikazani su na slici 6.9 a, a slici 6.9 b profil na kojem je ručno laminiranja, odnosno počelo umreživanje.



U  
po

Slika 6.9. Ručno laminiranje profila 3: a) nanošenje smole kistom i istiskivanje zraka, b) početak umreživanja



## 6.2. Proračun troškova

U tablici 6.1 prikazan je rezultat analize utrošenog materijala ojačavala, mase smole te sitnog materijala (odvajalo, kistovi i aceton). Ukupni trošak sitnog materijala je jednoliko raspoređen za svaki profil.

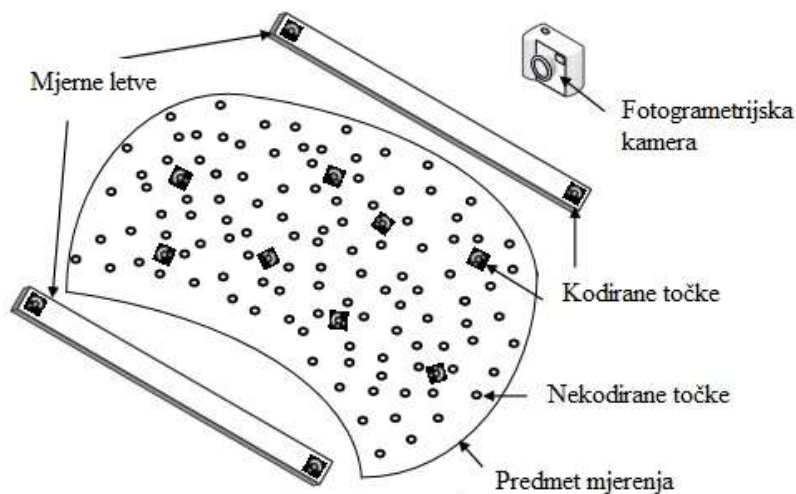
Tablica 6.1 Proračun utrošenog materijala te cijene profila

Proračun troškova	Profil 1	Profil 2	Profil 3
	M	MT	UMT
Površina sloja ojačavala [m <sup>2</sup> ]	0,345	0,345	0,345
Masa profila [kg]	2,7987	2,9168	1,8857
Masa smole [kg]	1,3	1,2	0,8
Masa ojačavala [kg]	1,4987	1,7168	1,0857
Cijena ojačavala [kn]	24,15	34,953	154,251
Cijena smole [kn]	54,6	50,4	33,6
Cijena ojačavala [kn/kg]	16,11397	34,9513	154,2493
Cijena ojačavala [kn/m <sup>2</sup> ]	24,15	34,9485	154,2495
Utrošak sitnog materijala [kn]	17,33333	17,33333	17,33333
<b>Cijena profila [kn]</b>	<b>96,0833</b>	<b>102,686</b>	<b>205,184</b>
<b>Cijena profila [kn/kg]</b>	<b>34,3314</b>	<b>35,2051</b>	<b>108,811</b>
<b>Cijena profila [kn/m]</b>	<b>144,125</b>	<b>154,03</b>	<b>307,777</b>

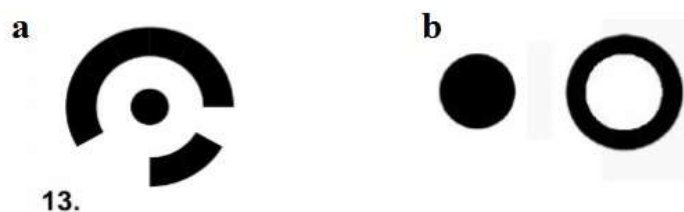
### 6.3. Mjerenje profila optičkim mjernim sustavom TRITOP

Profili će biti ispitani u optičkim trokoordinatnim mjernim uređajem *Tritop* proizvođača GOM GmbH. Uređaj se primjenjuje za precizno određivanje oblika, dimenzija i položaja većih i složenijih objekata, a određivanje se temelji na principu triangulacije, odnosno funkcije zavisnosti koordinata točaka na snimanom objektu i leći mjerne kamere odnosno fotografiji objekta (slika 6.10). Metoda koja se temelji na ovom principu naziva se fotogrametrija te se, zbog svoje praktičnosti, primjenjuje kod većih objekata poput čeličnih konstrukcija, zgrada, spremnika i strojeva. [32, 33, 34]

Mjerni uređaj sastoji se od fotogrametrijske kamere s fiksnom žarišnom duljinom, mjernih letvi i referentnih križeva pomoću kojih sustav određuje dimenzije mjenenog objekta, kodiranih točaka (slika 6.11 a) kojima se definira položaj nekodiranih točaka na 2D slici dobivenoj kamerom te nekodiranih točaka (slika 6.11. b) koje se postavljaju na željenim mjestima po objektu mjerenja. [34]



Slika 6.10. Princip rada mjernog uređaja *Tritop* [34]

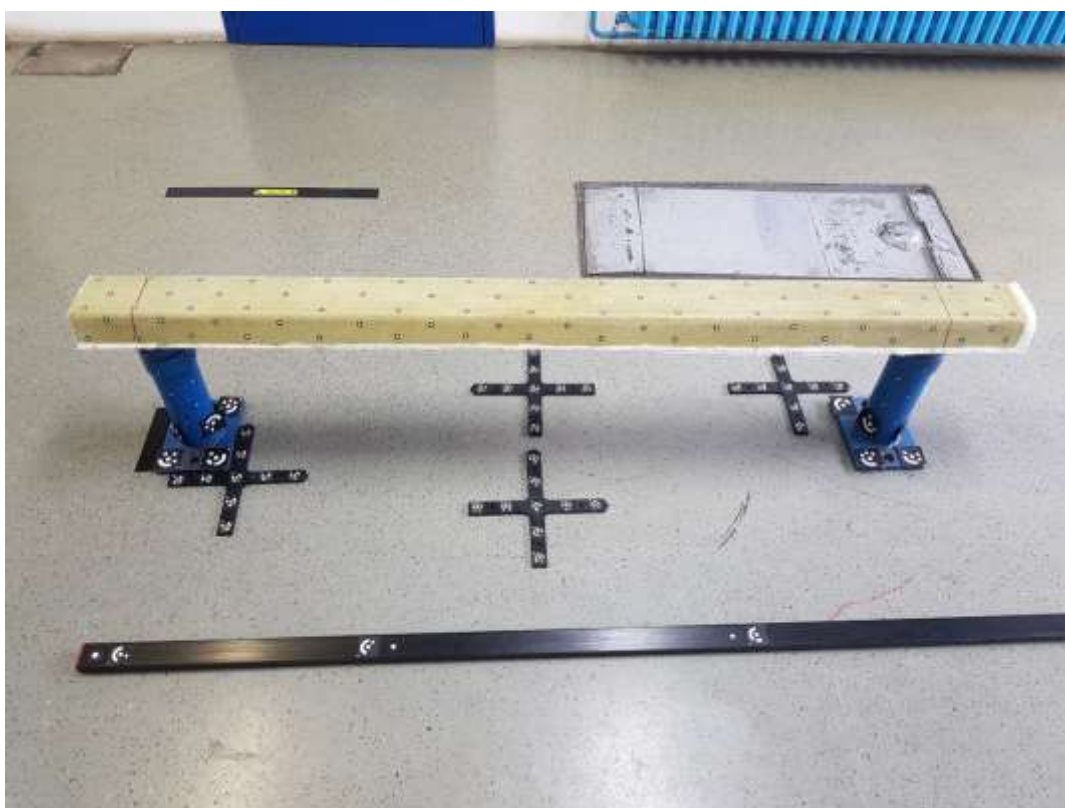


Slika 6.11. Mjerne točke: a) kodirana, b) nekodirana [32]

### 6.3.1. Opis ispitivanja profila

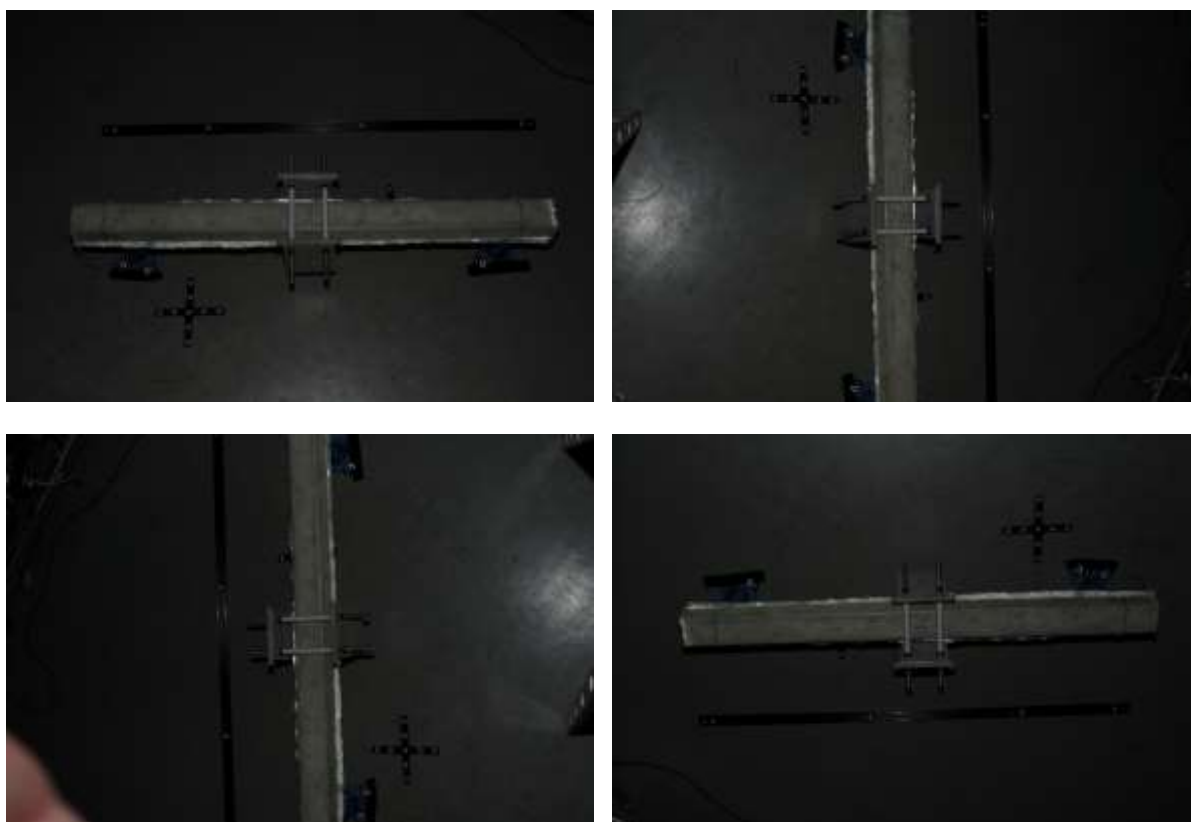
Ispitivanje profila napravljeno je u 5 koraka s progresivnim opterećenjem (20 kg, 40 kg, 60 kg, 80 kg i 100 kg). Zbog praktičnosti odabrani su čelični utezi od 10 kg koji se postavljaju na sredinu profila oslonjenog na oslonce u razmaku od 1500 mm. Zbog dimenzija utega oni su postavljeni na nosive šipke te pozicionirani simetrično oko sredine profila. Na slici 6.12 prikazan je postav za mjerenje profila 1 u neopterećenom stanju na kojem se mogu vidjeti mjerni križevi i letve, kodirane točke na oslancima te profil sa nekodiranim točkama. Vodoravni položaj profila provjeren je pomoću libele.

Ispitivanje se provodi pomoću mjerne letve i referentnih križeva budući da metoda zahtjeva da u svakoj fotografiji bude minimalno 5 kodiranih točaka. Mjerne letve potrebno je ostaviti da im se izjednači temperatura s okolinom potom im je potrebno izmjeriti temperaturu jer je to jedan od ulaznih parametara za ispitivanje.



Slika 6.12. Mjerni postav profila 1 u neopterećenom stanju

### 6.3.2. Mjerenje profila



Slika 6.13. Kalibracijske snimke tijekom mjerenja profila 2 opterećenog s 20 kg

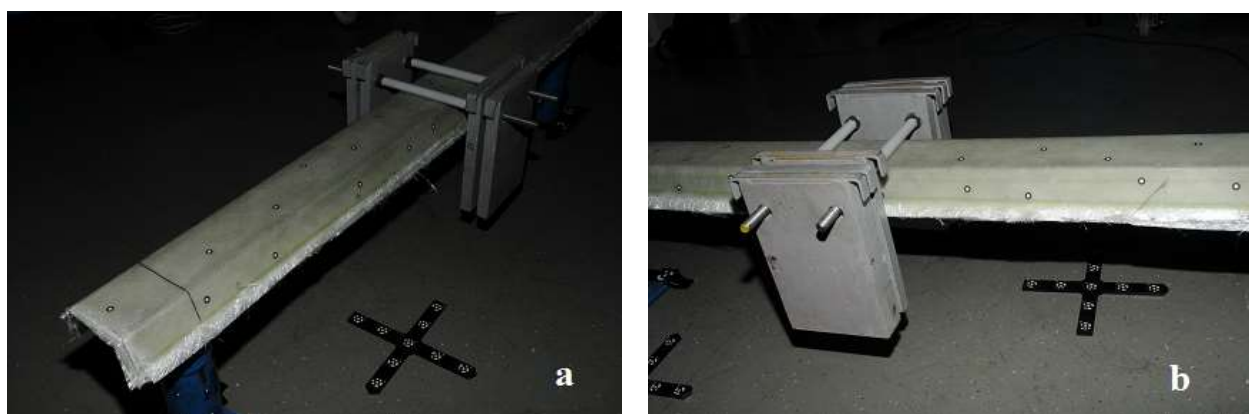
Svaki profil ima ukupno šest faza mjerenja (početno neopterećeno stanje te 5 varijanti opterećenih stanja: 20, 40, 60, 80 i 100 kg)). Prije svake faze potrebno je kalibrirati fotogrametrijsku kameru što se izvodi slikanjem mjernog postava s povišenog položaja s četiri snimke kamere koja se za svaku snimku zakreće za  $90^\circ$  kao što je prikazano na slici 6.13.

Mjerenja se provode u uvjetima smanjenog osvjetljenja jer su se na površini poda nalazile čestice izrazito reflektirajućeg efekta zbog kojeg ih je kamera tumačila kao nekodirane točke. Prvo mjerenje smatra se referentnim stanjem te u kasnijem postupku služi da bi se odredio pomak nekodiranih točaka u odnosu na neopterećeno stanje. Na slici 6.14 prikazano je neopterećeno stanje profila 1 te stanje opterećenja od 20 kg također na profilu 1.



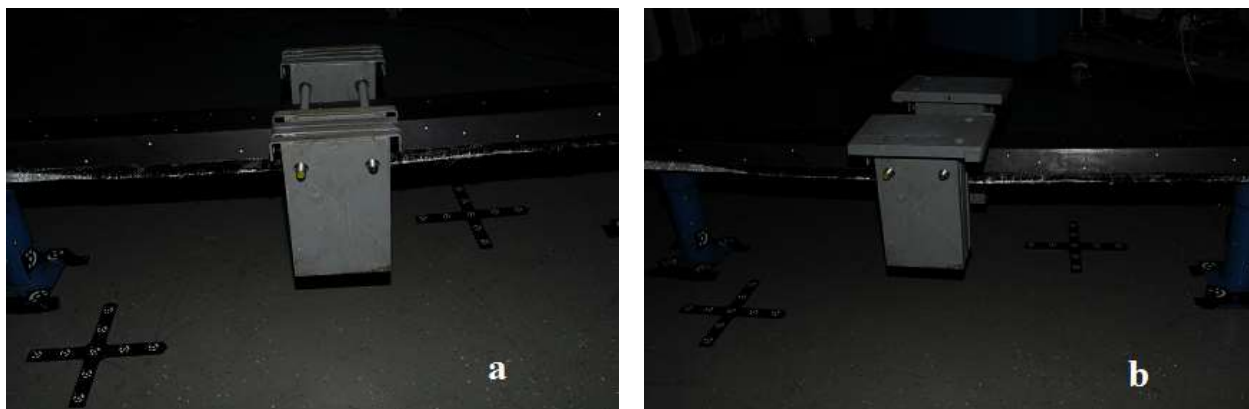
Slika 6.14. Profil 1: a) neopterećeno stanje, b) opterećenje od 20 kg

Ispitivanje profila 2 provedeno je na analogan način, dodavanje utega izvršeno je ručno uz dodatan oprez da se minimizira oscilacija ili eventualni pomak profila. Faze s 40 kg i s 60 kg prikazane su na slici 6.15.



Slika 6.15. Profil 2: a) opterećenje 40 kg, b) opterećenje 60 kg

U mjerenjima profila 2 i 3 primjenjen je manji broj nekodiranih točaka jer se prema rezultatima mjerenja profila 1 zaključilo da nema potrebe za gusto pravilno raspoređenim mjernim točkama. Mjerenje profila 3 provedeno je također na analogan način, a faze mjerenja prikazane su na slici 6.16.



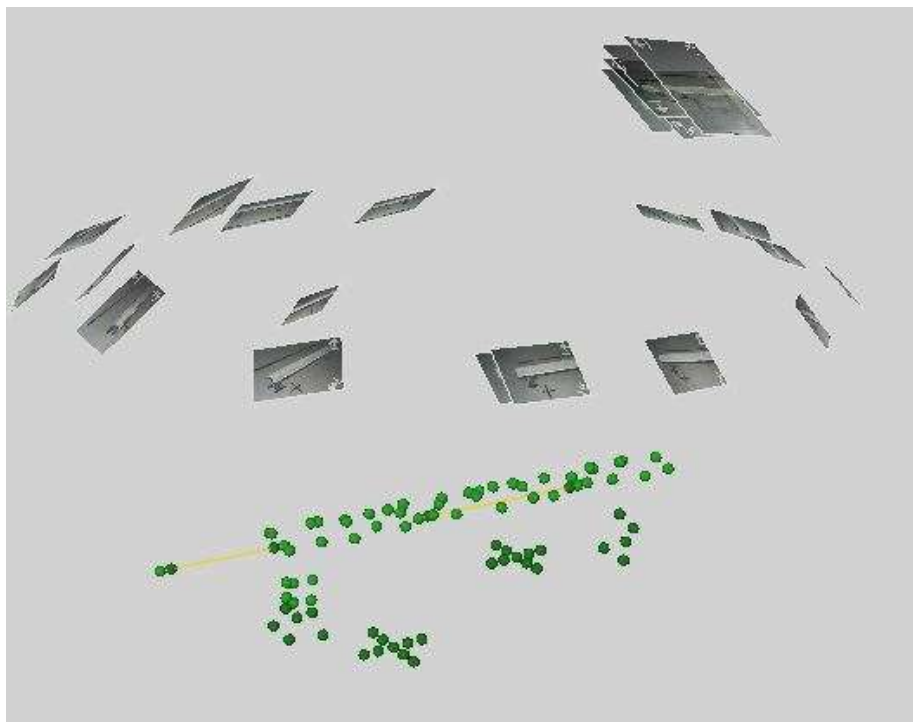
Slika 6.16. Profil 3: a) opterećenje od 80 kg, b) opterećenje od 100 kg

Nakon fotografiranja fotografije su obrađene u specijaliziranom softveru za optičko mjeriteljstvo *TRITOP Professional V7.5 SR2*. Na slici 6.17 prikazano je kako softver prepoznaje kodirane i nekodirane točke, a na slici 6.18 prikazan je oblak točaka (eng. *point cloud*) koji nastaje kada se proračunaju sve fotografije iz mjerenja.



Slika 6.17. Kodirane i nekodirane točke prepoznate na fotografiji (zeleno)





Slika 6.18. Oblak točaka te prikaz fotografija napravljenih u jednoj fazi

Postupak mjerenja se nastavlja tako da se u neopterećenom stanju dio točaka koji se smatra nepomičnim (u ovom slučaju oslonci mjernog postava) proglase krutim tijelom te se sve daljnje faze mjerenja uspoređuju s početnim položajem oblaka točaka.

### 6.2.3. Rezultati mjerenja profila

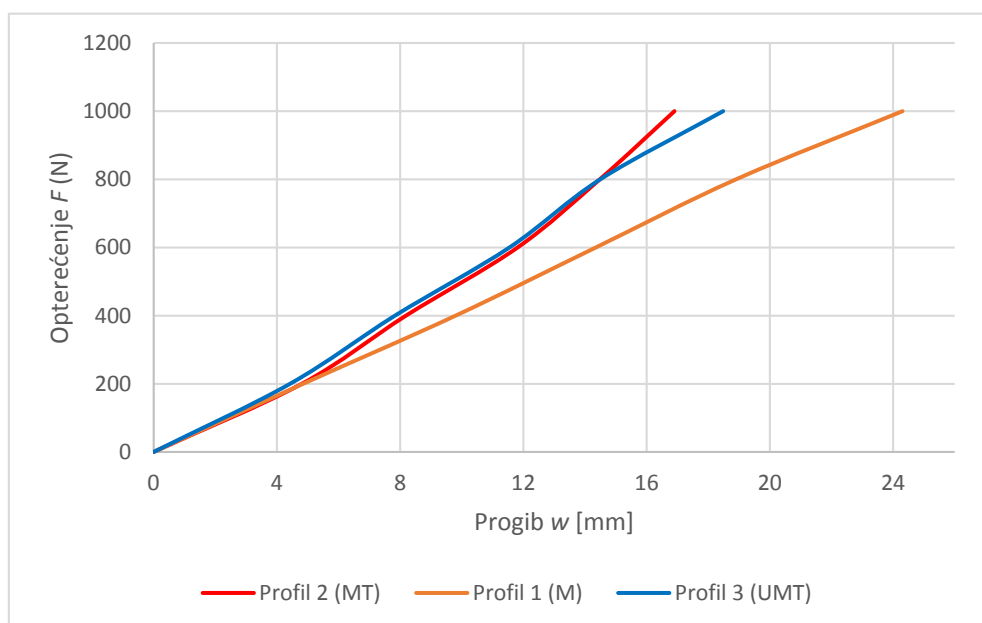
Rezultirajuće pomake su prikazani za svaku fazu ispitivanja na tablici 4.

Tablica 4. Rezultati mjerenja sustavom *Tritop*

Opterećenje $F$ [N]	Progib $w$ [mm]		
	Profil 1	Profil 2	Profil 3
200	4,852	4,812	4,428
400	9,803	8,19	7,834
600	14,351	11,814	11,55
800	18,905	14,482	14,498
1000	24,309	16,906	18,487

Grafički prikaz ovisnosti sile opterećenja i porasta pomaka za svaki profil prikazana je na slici

6.19.



Slika 6.19. Ovisnost sile opterećenja i rezultirajućeg pomaka

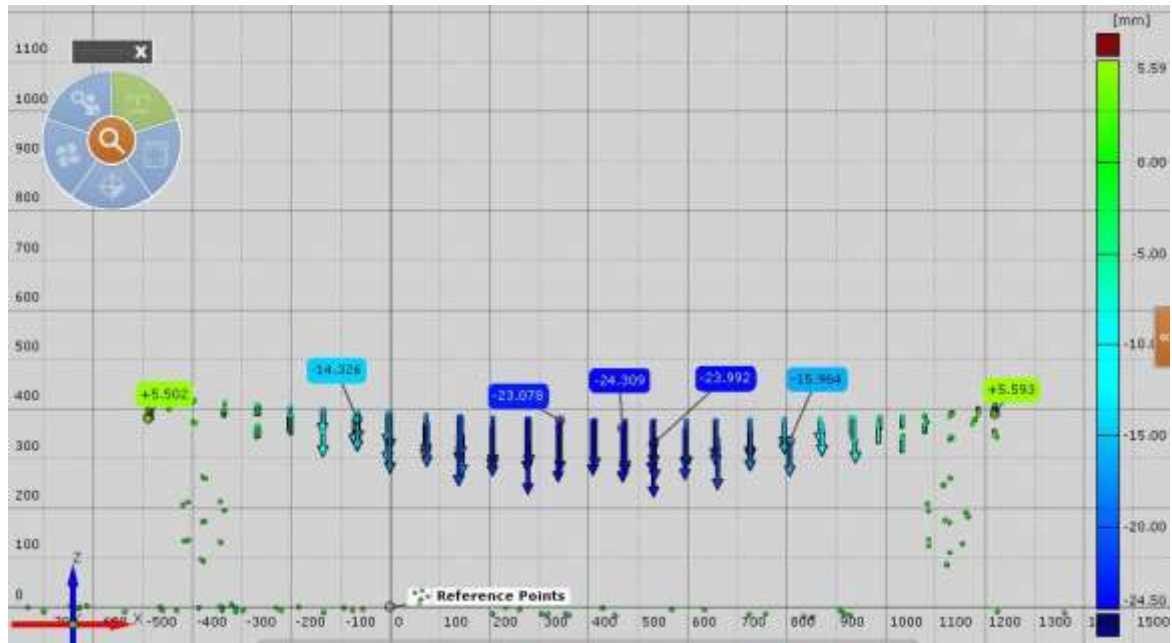
Iz rezultata možemo zaključiti da najbolje ponašanje ima profil 2 budući da za porastom opterećenja pokazuje najblaži prirast povećanja pomaka, s druge strane maksimalne vrijednosti pomaka zabilježene su kod profila 1 koji ima gotovo strogo linearnu karakteristiku. Također možemo zaključiti da je ponašanje profila 1 i 2 vrlo slično u ovom području opterećenja.

Raspodjelu progiba duž konture svakog profila pri maksimalnom opterećenju možemo vidjeti na slikama 6.20, 6.21 i 6.22.

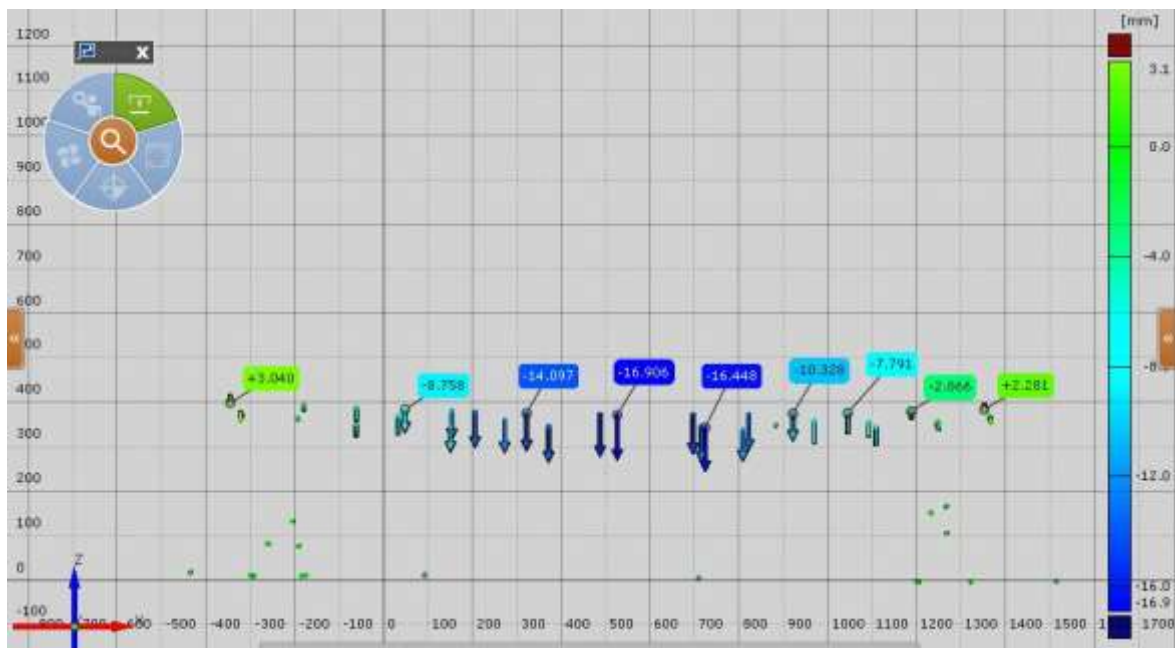
Iz slika se može zaključiti da se profili ponašaju slično kao primjeri mehaničkih konstrukcija u stručnoj literaturi, odnosno možemo uočiti karakterističnu krivulju raspodjele pomaka (dobar prikaz je slika 6.20. s više mjernih točaka) te da se krajnje točke blago podižu.

Softver omogućava i analizu pomaka u ostalim koordinatnim osima kao i prikaz ukupnog pomaka za svaku točku. Pregledom rezultata uočeno je da su vrijednosti ukupnog pomaka vrlo slične vrijednostima progiba što nas dovodi do zaključka da se profil nije pomicao tijekom mjerenja odnosno promjene utega te je mjerenje pouzdano.

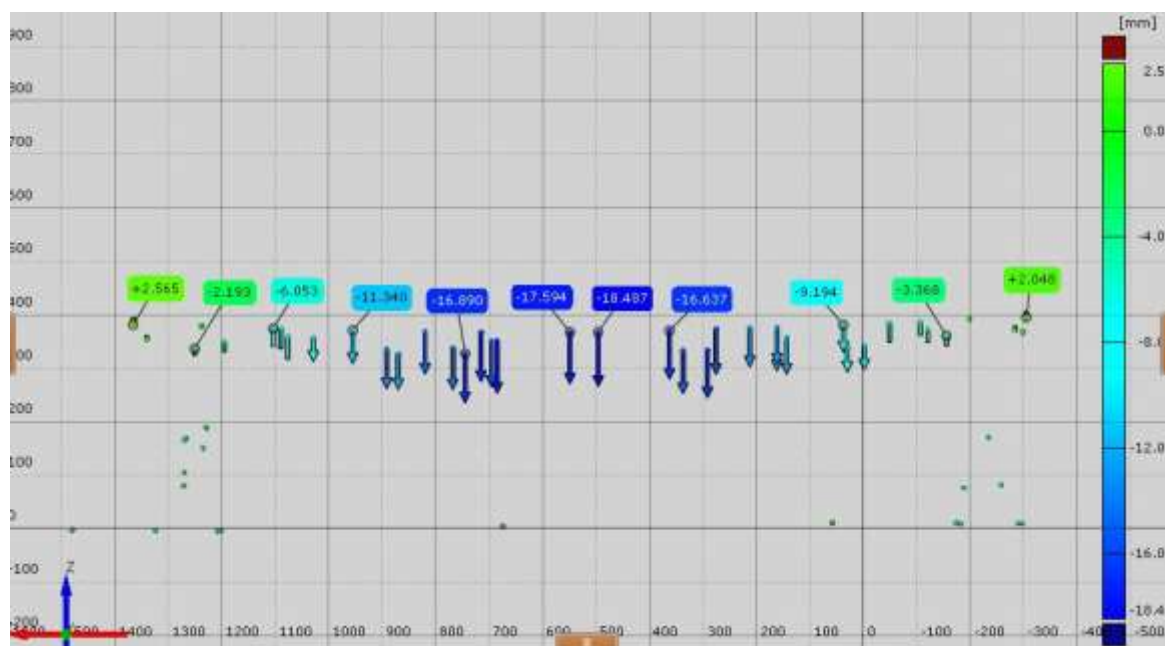




Slika 6.20. Profil 1: raspodjela pomaka uslijed opterećenja od 100 kg



Slika 6.21. Profil 2: raspodjela pomaka uslijed opterećenja od 100 kg



Slika 6.22. Profil 3: raspodjela pomaka uslijed opterećenja od 100 kg

Dijagramski prikaz raspodjele pomaka s vrijednostima na odabranim mjernim točkama za sva opterećenja profila 1 nalazi se u prilogu rada.

#### 6.4. Ispitivanja mehaničkih svojstava kompozitnih profila

Iz profila su izrezana ispitna tijela normiranih dimenzija za određivanje žilavosti, rasteznih i savojnih svojstava. Ispitivanja su provedena prema trenutno važećim normama u laboratorijskim uvjetima.

##### 6.4.1. Ispitivanje žilavosti po Izodu

Ispitivanje žilavosti po Izodu je provedeno prema normi HRN EN ISO 180-1: 2004. Prema navedenoj normi za polimere ojačane vlaknima dimenzije ispitnih tijela su 10x80 mm, dok je debljina određena prema debljini samog profila. [35]

Uređaj za ispitivanje žilavosti (slika 6.23) omogućava mjerenje na 5 skala, a za potrebe ispitivanja ispitnih tijela uzet je Izod bat 7,5 J.



Slika 6.23. Uređaj za ispitivanje žilavosti po Izodu

Ispitivanja se izvodi tako da se ispitno tijelo pozicionira u oslonac, mjerna skala postavlja na nulu te se iz gornjeg položaja otpušta bat normirane mase i dimenzija koji u slobodnom padu rotira te udara u ispitno tijelo (slika 6.24). U trenutku kontakta mehanizam uređaja zabilježi energiju udara. Normom su propisani karakteristični slučajevi pucanja ispitnog tijela te kriteriji za zadovoljavajuće ispitivanje. Izmjerena vrijednost energije udara smatra se ulaznim podatkom za proračun žilavosti prema izrazu: [35]

$$a_i = \frac{E_c}{b \cdot h} \cdot 1000 \quad (5)$$

Gdje su:

$a_i$  – žilavost materijala [ $\text{kJ/m}^2$ ]

$E_c$  – energija loma [J]

$b$  – širina ispitnog tijela [mm]

$h$  – debljina ispitnog tijela [mm]



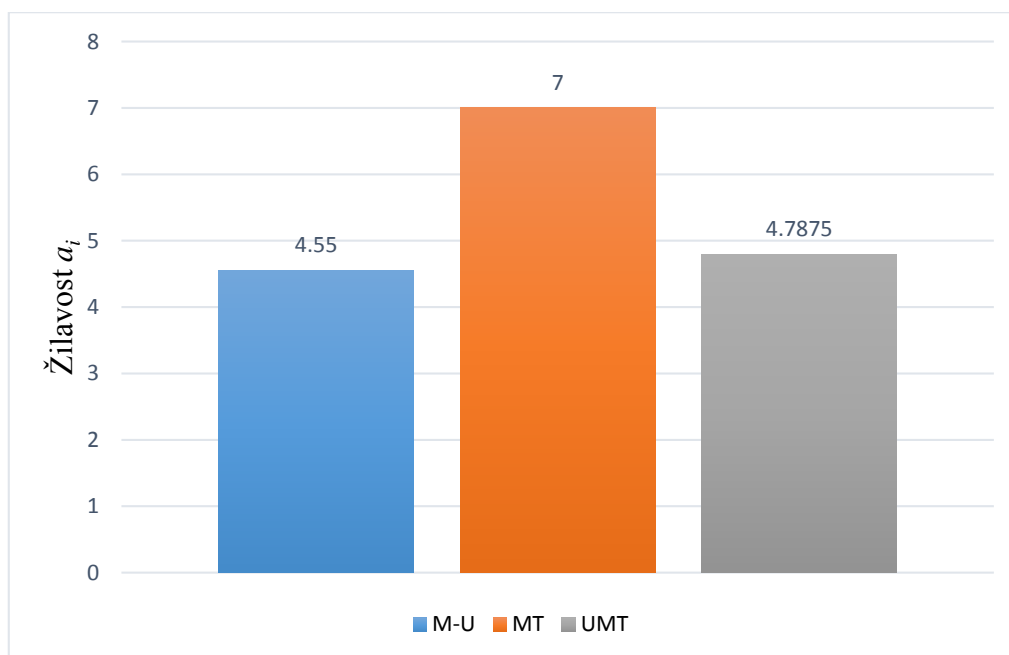
Slika 6.24. Ispitivanje žilavosti po Izodu: a) ispitno tijelo u čeljustima, b) udar bata u ispitno tijelo

Dimenzije ispitnih tijela korištenih u ispitivanju nalaze se u prilogu rada (tablice 5 i 6).

Za mjerenje ispitnih tijela korišteno je digitalno pomično mjerilo, a niske vrijednosti standardne devijacije pokazuju da su odstupanja zadovoljavajuća.

Rezultati ispitivanja te prema izrazu (5) izračunata žilavost prikazani su u tablici 7 u prilogu rada.

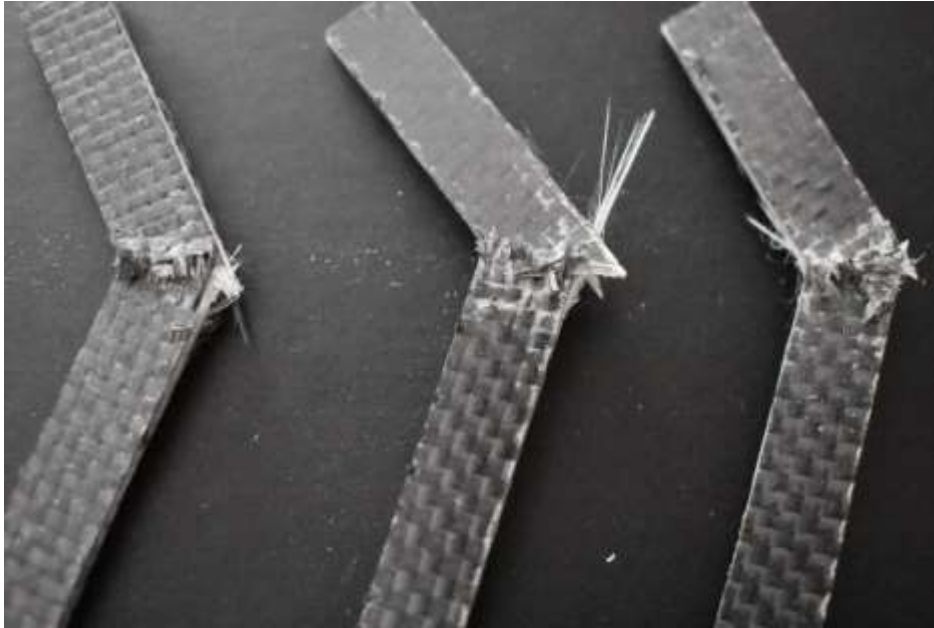
Na slici 6.25 usporedno su prikazani rezultati žilavosti za sve profile.



Slika 6.25. Rezultati određivanja žilavosti po Izodu

Rezultati pokazuju da najviše vrijednosti žilavosti ima materijal profila 3, odnosno ispitno tijelo načinjeno od tkanine ugljikovih vlakana, staklenog mata i tkanine staklenih vlakana.

Na slici 6.26. prikazani su ispitna tijela profila 3 nakon određivanja žilavosti.



Slika 6.26. Ispitna tijela profila 3 nakon provedeno ispitivanja žilavosti po Izodu

Prilikom ispitivanja profila oznake MT (skakleni mat i tkanina) uočena je delaminacija kompozita koja može biti posljedica lošeg natapanja smolom između slojeva tkanine (slika 6.27) prilikom postupka izrade.



Slika 6.27. Raslojavanje ispitnih tijela

### 6.4.2. Ispitivanje rastezних svojstva

Rastezna svojstva ispituju se prema normi HRN EN ISO 5227-4:2008. [36]

Ispitivanje je provedeno na kidalici *Shimadzu AG-X plus*, maksimalne sile 300 kN, a ispitivanje je provedeno pri 23 °C. Ispitna tijela su ispitana sa razmakom čeljusti od 150 mm te brzinom ispitivanja od 2 mm/min.



Slika 6.28. Kidalica *Shimadzu AG-X plus*

Prema navedenoj normi rastezna čvrstoća definira se izrazom:

$$R_m = \frac{F_{max}}{A_0} \quad (6)$$

A prekidna čvrstoća izrazom:

$$R_p = \frac{F_p}{A_0} \quad (7)$$

Gdje je:

$R_m$  – [N/mm<sup>2</sup>] rastezna čvrstoća

$R_p$  – [N/mm<sup>2</sup>] prekidna čvrstoća

$F_{\max}$  – [N] maksimalna sila

$F_p$  – [N] prekidna sila

$A_0$  – [mm<sup>2</sup>] površina poprečnog presjeka ispitnog tijela

Modul rastezljivosti je definiran izrazom:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (8)$$

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \text{ [%]} \quad (9)$$

Gdje je:

$\sigma$  – [N/mm<sup>2</sup>] rastezno naprezanje

$E$  - [N/mm<sup>2</sup>] modul rastezljivosti

$\sigma_1$ ;  $\sigma_2$  – [N/mm<sup>2</sup>] naprezanja pri istezanju  $\epsilon_1 = 5 \%$   $\epsilon_2 = 25 \%$

$\epsilon$  – [%] istezanje

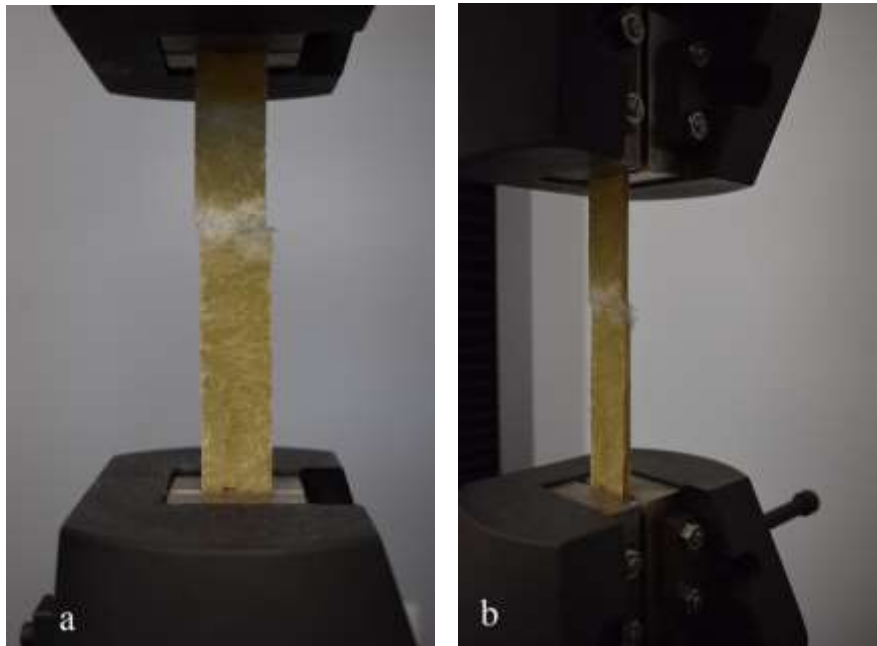
$\Delta l$  – [mm] produljenje

$l_0$  – [mm] početna duljina

Za ispitivanje rastezne čvrstoće izrezana su ispitna tijela tipa 2 oblika i dimenzija 24x250 mm definiranog prema normi. Ispitivanje je provedeno brzinom od 2 mm/min, a ispitna tijela pozicionirana su na kidalici razmakom čeljusti od 150 mm. Dimenzije svih ispitnih tijela za određivanje rasteznih svojstava dana su u prilogu u tablici 8.

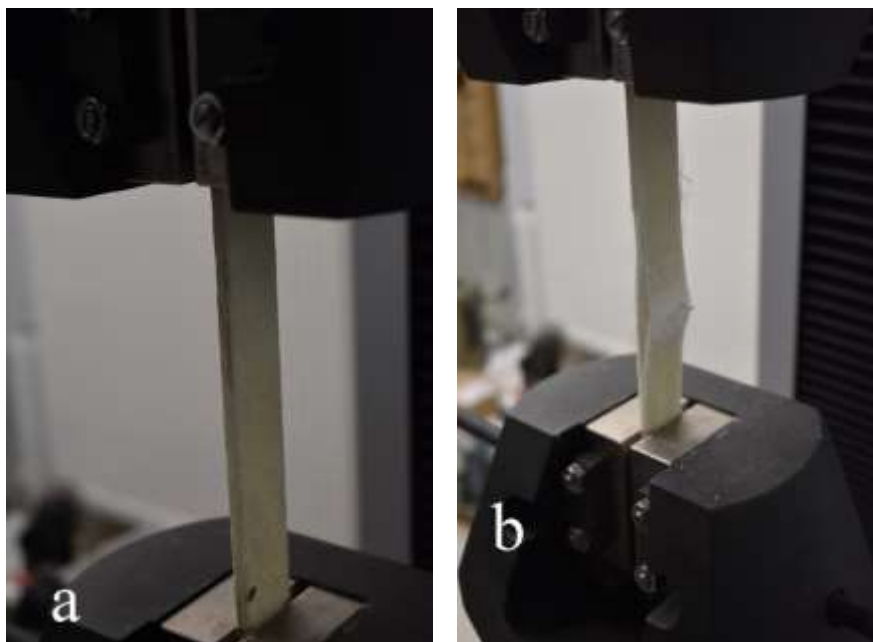
Rezultati i ispitnog tijela profila 1 pokazuju vidljive lomove staklenih vlakana na površini materijala, a činjenica da se tijekom ispitivanja čuo zvuk pucanja vlakana i prije postizanja maksimalne sile govori da vlakna pucaju i u unutrašnjosti materijala (slika 6.29).





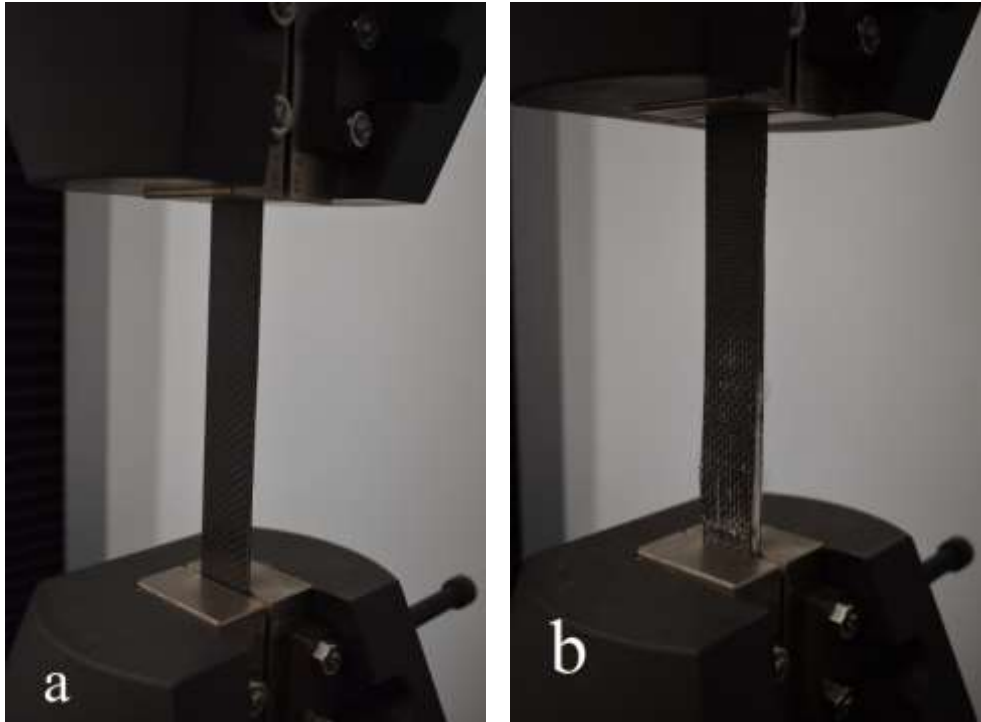
Slika 6.29. Rezultat razvlačenja ispitnog tijela od staklenog mata

Na slici 6.30 prikazano je ispitno tijelo profila 2 tijekom ispitivanja. Vidljiva je djelomična delaminacija uzorka (na slici 6.30 b).



Slika 6.30. Ispitno tijelo profila 2: a) prije ispitivanja,  
b) nakon ispitivanja

Na slici 6.31 možemo vidjeti rezultat ispitivanja ispitnog tijela profila 3 (hibrid ugljičnih i staklenih vlakana). Na ispitnim tijelima profila 3 nije došlo do delaminacije niti loma kao kod profila 1, već do i jedva vidljivog loma na tkanini ugljičnog vlakna (na slici 5.26 b)



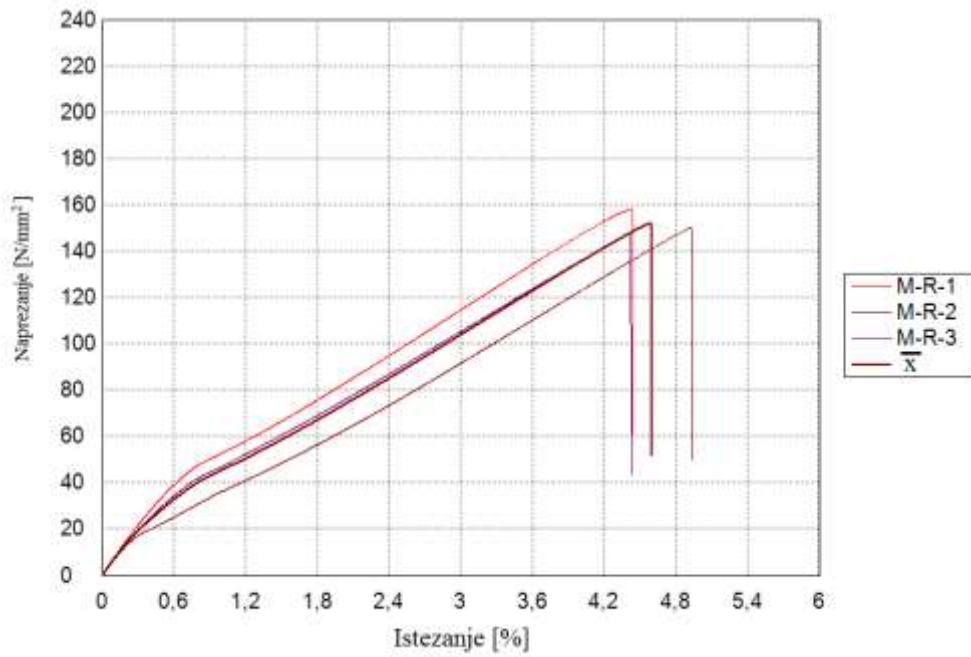
Slika 6.31. Ispitno tijelo profila 3\_ a) prije, b) nakon ispitivanja

U tablici 6 prikazani su rezultati ispitivanja rasteznih svojstava za sva ispitna tijela.

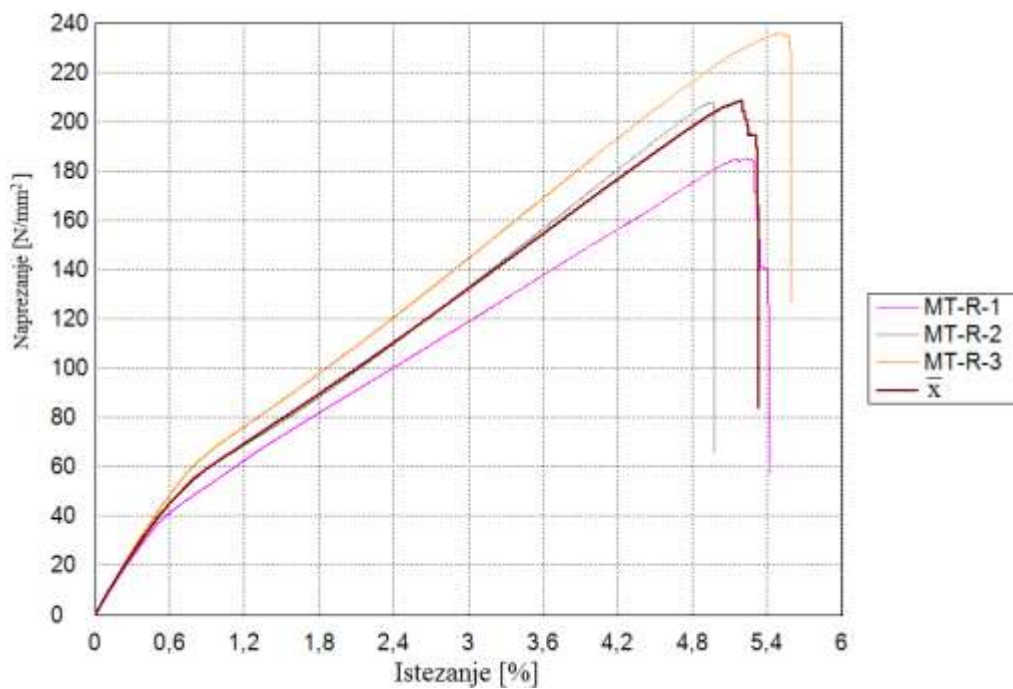
Tablica 5. Rezultati ispitivanja rasteznih svojstava

Ispitno tijelo	Maksimalna sila [N]	Rastezna čvrstoća [N/mm <sup>2</sup> ]	Prekidna sila [N]	Prekidna čvrstoća [N/mm <sup>2</sup> ]	Prekidni pomak [mm]	Prekidna deformacija [%]	Rastezni modul E [N/mm <sup>2</sup> ]
M-R-1	19183,4	158,23	19151	157,97	6,65332	4,436	7325,03
M-R-2	17406,4	150,01	17175,1	148,02	7,40098	4,933	6036,74
M-R-3	17505	147,78	17504,5	147,77	6,6366	4,424	6422
Srednja vrijednost, $\bar{x}$ [mm]	18031,6	152,01	17943,5	151,25	6,89697	4,598	6594,59
Standardna devijacija, $S$ [mm]	998,706	5,51	1058,59	5,82	0,43657	0,291	661,259
UMT-R-1	14309,4	187,75	9137,49	119,89	5,30424	3,536	12813,5
UMT-R-2	14503,8	170,86	13129,7	154,68	5,23923	3,493	11120
UMT-R-3	13928,3	189,84	13822,7	188,4	4,85189	3,235	12911,3
Srednja vrijednost, $\bar{x}$ [mm]	14247,2	182,82	12030	154,32	5,13179	3,421	12281,6
Standardna devijacija, $S$ [mm]	292,754	10,41	2528,81	34,26	0,24457	0,1631	1007,16
MT-R-1	22115,8	184,79	10839,7	90,57	8,13091	5,421	7968,9
MT-R-2	24710	207,87	24193,3	203,52	7,46404	4,976	8256,44
MT-R-3	25806,6	235,74	24701,2	225,64	8,38794	5,592	8820,12
Srednja vrijednost, $\bar{x}$ [mm]	24210,8	209,47	19911,4	173,25	7,9943	5,3295	8348,49
Standardna devijacija, $S$ [mm]	1895,36	25,51	7860,43	72,45	0,47686	0,3179	433,011

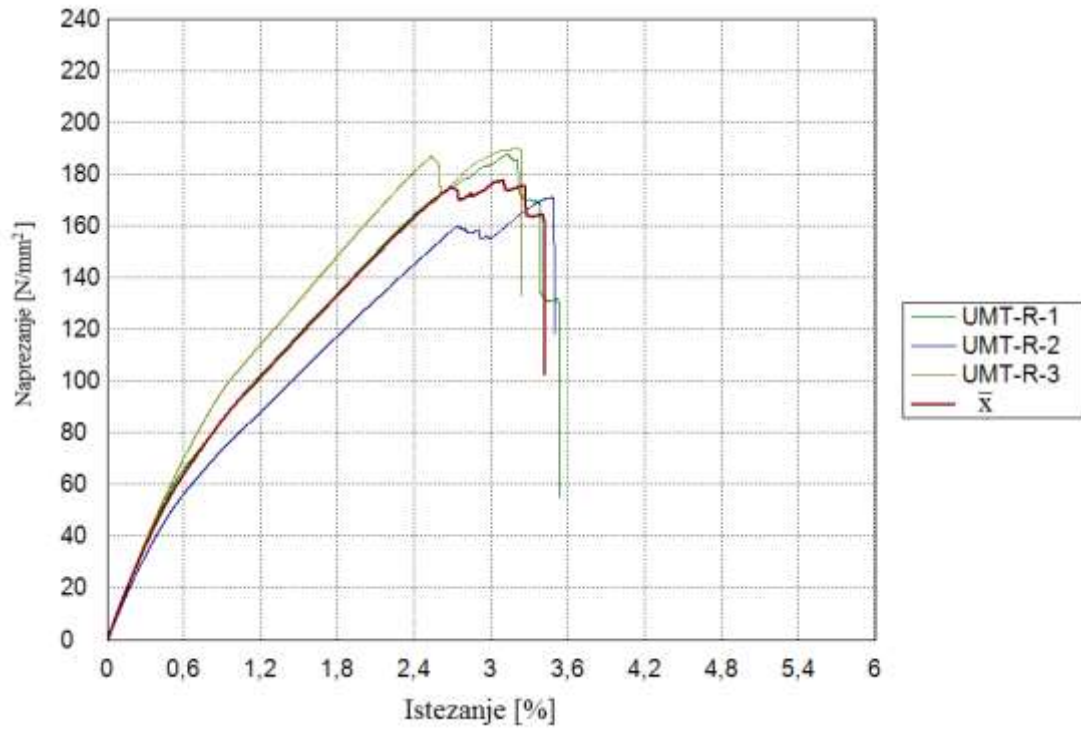
Na slikama 6.32 do 6.34 prikazani su dijagrami rasteznog naprežanja – istežanje za pojedina ispitna tijela profila, dok je na slici 6.35 prikazana usporedba svatri profila uz prikaz krivulje srednje vrijednosti.



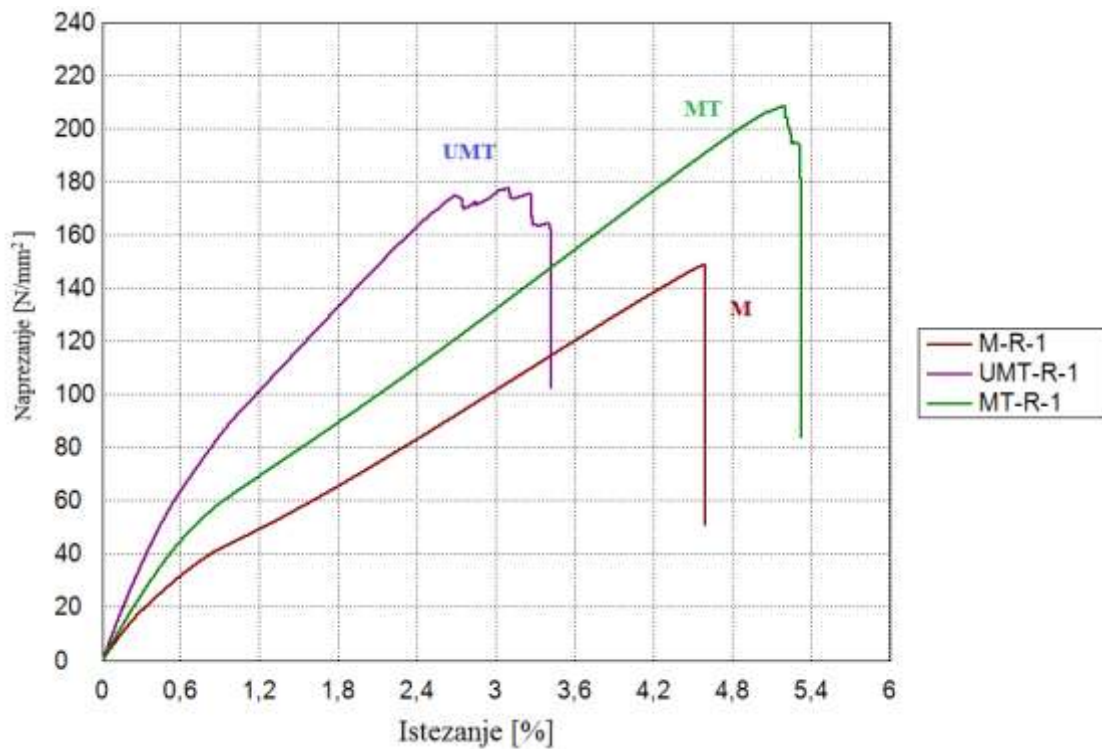
Slika 6.32 Dijagram rasteznog napreznje-istezanje kompozita M-R



Slika 6.33 Dijagram rasteznog napreznje-istezanje kompozita MT-R



Slika 6.34 Dijagram rasteznog napreznosti-istežanja kompozita UMT-R



Slika 6.35. Dijagram rasteznog napreznosti-istežanja za sve ispitivane kompozite

Vrijednost prekidnog istežanja je kod profila 2 najviša, nakon čega slijedi profil 1 te je najniža kod profila 3. No za element poput podnice bitno svojstvo je i modul rastezljivosti koji je najviši kod profila 3 (ugljična vlakna) što je i logično.

Na temelju rezultata provedenih ispitivanja (tablica 5 i slika 6.35) da najviše vrijednosti rastezne i prekidne čvrstoće ima profil 2, odnosno kompozit ojačan kombinacijom staklenog mata i tkanine, zatim hibridni kompozit ojačan ugljičnim i staklenim vlaknima, a najniže vrijednosti ima kompozit ojačan staklenim vlaknima u formi mata.

### 6.4.3. Ispitivanje savojnih svojstava

Ispitivanje savojnih svojstava provodi se po normi HRN EN ISO 14125:2005. [37]

Ispitivanje je provedeno na kidalici *Shimadzu AGS-X* maksimalne sile 10 kN. Ispitivanje je provedeno pri temperaturi od 23 °C i relativnoj vlažnosti zraka 49 %. Brzina ispitivanja iznosila je 2 mm/min. Polumjer valjaka oslonaca za ispitna tijela  $h > 3$  mm  $R_2 = 5 \pm 0,2$  mm

Polumjer valjka koji pritišće ispitno tijelo  $R_1 = 5 \pm 0,2$  mm.

Ispitivanje se provelo na razmacima oslonaca:

$L = 64$  mm za ispitna tijela profila 1,

$L = 40$  mm za ispitna tijela profila 2,

$L = 80$  mm za ispitna tijela profila 3

Savojna čvrstoća se prema normi definira izrazom: [37]

$$\sigma_{fM} = \frac{3 \cdot F_m \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (11)$$

Modul savojnosti određuje se izrazom:

$$E_f = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1} \quad (10)$$

Gdje je:

$\sigma_{fM}$  – [Mpa, N/mm<sup>2</sup>] savojna čvrstoća

$E_f$  – [N/mm<sup>2</sup>] modul savojnosti

$F_m$  – [N] maksimalna sila

$L$  – [mm] razmak oslonaca

$b$  – [mm] širina ispitnog tijela

$h$  – [mm] debljina ispitnog tijela

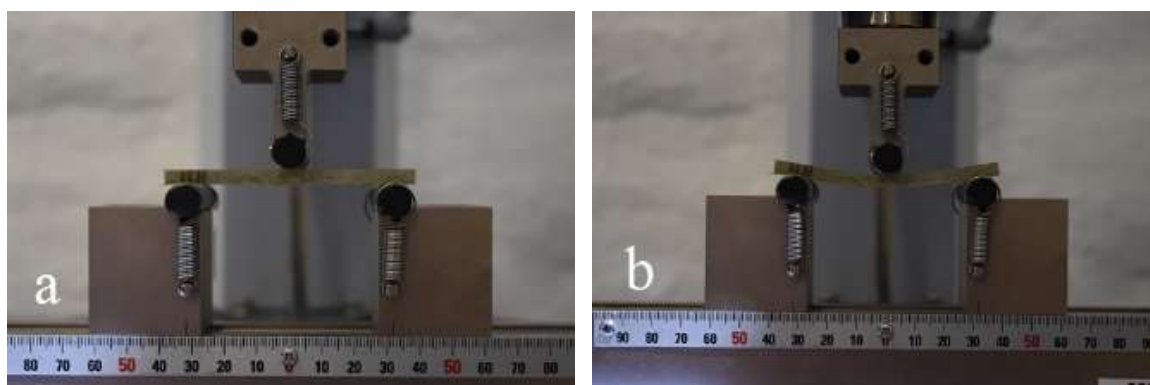
$\sigma$  – [N/mm<sup>2</sup>] savojno naprezanje

$\sigma_1, \sigma_2$  – [N/mm<sup>2</sup>] savojna naprezanja kod istezanje  $\varepsilon_1 = 5\%$  ,  $\varepsilon_2 = 25\%$

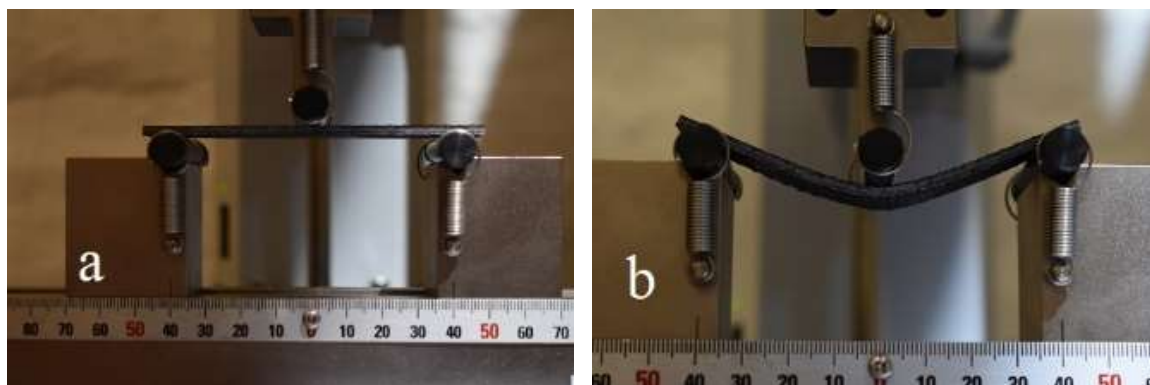
$\varepsilon$  – [%] istezanje

Dimenzije ispitnih tijela za ispitivanje savojnih svojstava nalaze se u prilogu (tablica 10 i 11).

Na slikama 6.40 i 6.41 može se vidjeti ispitivanje profila 1 i 3 te vidljiv progib uslijed opterećenja.



Slika 6.36. Ispitivanje ispitnog tijela profila 1: a) prije ispitivanja, b) tokom ispitivanja



Slika 6.37. Ispitivanje ispitnog tijela profila 3: a) prije ispitivanja, b) tokom ispitivanja

Detalji oštećenja ispitnih tijela tijekom ispitivanja prikazani su na slikama 6.41 i 6.42. Moguće je uočiti različite karakteristike loma, ispitno tijelo od tkanine iz ugljičnih vlakana nema toliko intenzivno oštećenje poput ispitnog tijela od staklenog mata odnosno nisu vidljiva raspucana vlakna, a ispitno tijelo je donekle zadržalo cjelovitost.



Slika 6.38. Oštećenje ispitnog tijela UMT-S-2 uslijed ispitivanja



Slika 6.39. Oštećenje ispitnog tijela M-S-4 uslijed ispitivanja

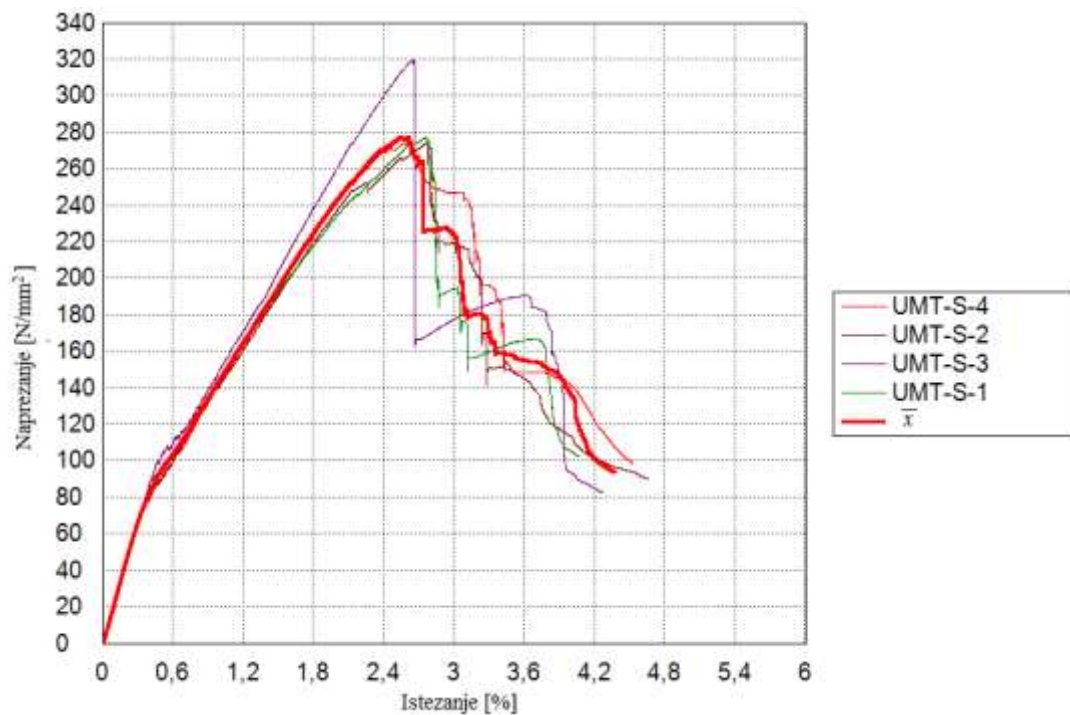
Rezultati ispitivanja usporedno su prikazani na tablici 6 u nastavku.



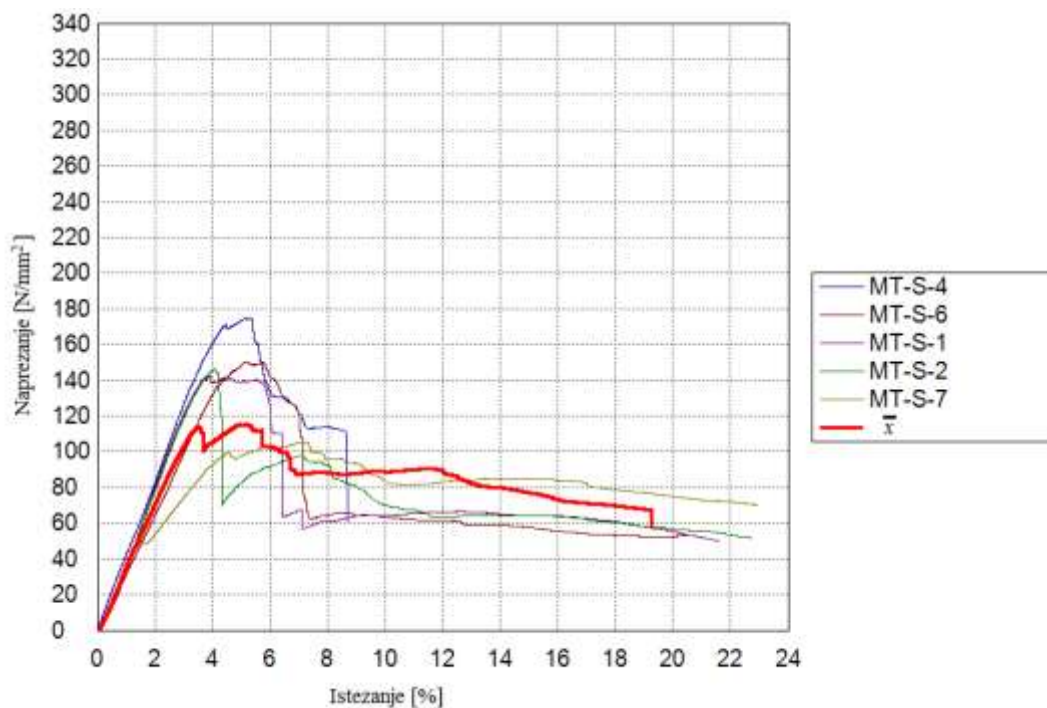
Tablica 6. Rezultati ispitivanja savojnih svojstava

Ispitno tijelo	Maksimalna sila	Savojna čvrstoća	Savojni modul elastičnosti
	[N]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
UMT-S-4	282,882	274,294	23798,6
UMT-S-3	266,504	274,225	22766,1
UMT-S-2	332,853	319,76	23179,9
UMT-S-1	271,324	277,186	22734
Srednja vrijednost, $\bar{x}$	288,391	286,366	23119,7
Standardna devijacija $S$	30,423	22,31	496,094
M-S-4	622,35	216,48	6578,75
M-S-5	535,998	196,406	7103,13
M-S-6	868,713	222,254	7759,89
M-S-1	540,064	188,259	6345,77
M-S-2	764,527	236,732	7570,58
M-S-3	901,699	236,732	7754,56
Srednja vrijednost, $\bar{x}$	705,558	236,732	7185,45
Standardna devijacija $S$	162,253	236,732	613,534
MT-S-4	909,91	174,594	4420,32
MT-S-6	721,571	150,212	3292,1
MT-S-1	716,562	142,428	4649,63
MT-S-2	811,229	146,337	4339,86
MT-S-7	632,798	105,064	3679,14
Srednja vrijednost, $\bar{x}$	758,414	143,727	4076,21
Standardna devijacija $S$	105,628	24,991	567,721

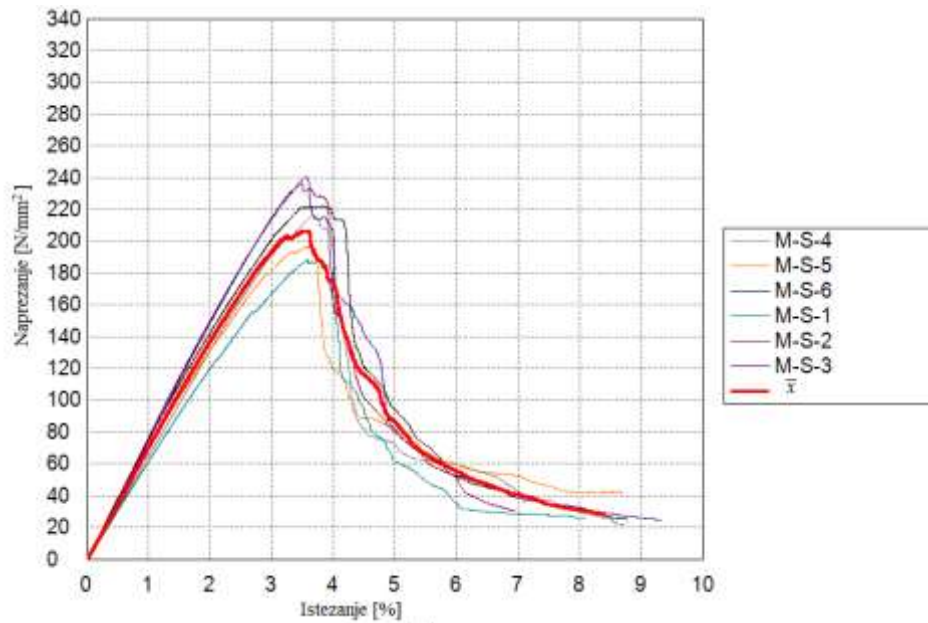
Dijagrami savojnog naprežanja i deformacija za svaku skupinu ispitnih tijela prikazani su na slikama od 6.43, do 6.46. na kojoj je prikazana samo krivulja srednjih vrijednosti za svaku pojedinu skupinu ispitivanog kompozita te se na temelju tih rezultata može zaključiti da hibridni kompozit (oznake UMT-S) pokazuje očekivano višu krutost u odnosu na ostala dva, odnosno da kompozit od staklenog mata (oznake M) i staklenog mata i tkanine (oznake MT-S) imaju značajno niži modul savojnosti. Profil 1 i 2 izdržali su izrazito niže naprežanje, no uslijed istog je nastala značajnije viša deformacija materijala. Valja uočiti da ispitna tijela nisu potpuno slomljena stoga se ne mjeri prekidna savojna sila i prekidna savojna čvrstoća. Tijekom ispitivanja u ispitnim tijelima su pucala vlakna unutar ispitnih tijela prije nego je ispitivanje zaustavljeno.



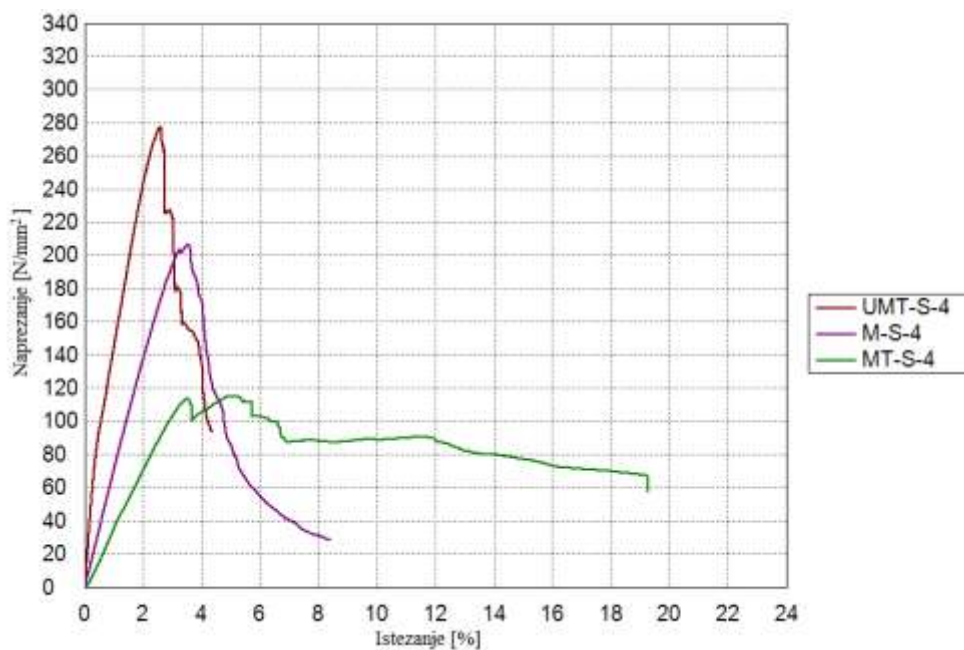
Slika 6.40. Dijagram savojnog napreznja – istežanje za hibridni kompozit



Slika 6.41. Dijagram savojnog napreznja – istežanje za mat-tkanina kompozit



Slika 6.42. Dijagram savojnog napreznja – istežanje za mat kompozit



Slika 6.43. Dijagram savojnog napreznja – istežanje usporedno za sve kompozite

Iz tablice 6. vidljivo je da su vrijednosti maksimalne sile ostvarene kod ispitnih tijela skupina M-S i MT-S znatno više od ispitnih tijela UMT-S, no obzirom na površinu najvišu savojnu čvrstoću ima hibridni kompozit izrađen od tkanine ugljičnih vlakana (grupa ispitnih tijela UMT-S)

### 6.4.5. Rasprava

U tablici 7. prikazane su cijene profila iskazane po jedinici mase i dužine profila te srednje vrijednosti rastezne i savojne čvrstoće budući da su to svojstva koja se vrlo često primjenjuju u razmatranju strojarskih konstrukcija i njihovom proračunu. Na temelju svih provedenih ispitivanja možemo zaključiti da hibridni kompozit (profil 3) ima bolja mehanička svojstva no i višu cijenu. Ispitivanja profila sustavom Tritop pokazala su da se profili od hibridnog kompozita i kompozita od staklene tkanine ponašaju vrlo slično, no ispitivanja žilavosti po Izodu pokazuju da je kompozitni materijal od staklene tkanine (profil 2) izrazito pogodniji za odabir u slučaju kriterija žilavosti materijala. Budući da je masa izrazito bitno svojstvo u razmatranju adekvatnog materijala elemenata vozila, na osnovu ispitivanja možemo zaključiti da bi primjena hibridnog kompozita imala znatan učinak na mehanička svojstva u slučaju pretežno savojno opterećenih konstrukcija te bi smanjenje mase od otprilike 30 % imalo opravdanje. Također imajući na umu cijenu izraženu po jedinici duljine vidimo znatnu razliku između hibridnog kompozita i preostala dva što nam govori da bi njegova primjena zahtjevala razmatranje optimizacije vozila u smislu smanjenja mase uslijed smanjenja dimenzija vozila u odnosu na učinak smanjenja mase primjenom hibridnog kompozita. Kompoziti od mata i staklene tkanine se masom i cijenom vrlo malo razlikuju, no ispitivanja su pokazala velike razlike u mehaničkim svojstvima.

Tablica 7. Usporedba profila

Usporedba profila	Profil 1	Profil 2	Profil 3
	M	MT	UMT
Masa profila [kg]	2,7987	2,9168	1,8857
Cijena profila [kn]	96,083	102,68	205,18
Cijena profila [kn/kg]	34,33	35,20	108,81
Cijena profila [kn/m]	144,13	154,02	307,77
Rastezna čvrstoća [N/mm <sup>2</sup> ]	152,01	209,47	182,82
Savojna čvrstoća [N/mm <sup>2</sup> ]	236,732	143,727	286,366

## 7. ZAKLJUČAK

Suvremena proizvodnja vozila za prijevoz putnika mora zadovoljiti zahtjeva konkurentnosti tržišta, trendova razvoja svijesti društva te zakonske regulative. Ciljevi smanjenja utjecaja na okoliš i održivosti diktiraju upotrebu lakših materijala kao što su kompozitni materijali u gospodarskim vozilima. Elektrifikacija i hibridizacija ovakvih vozila samo je dodatni izazov na konstrukciju strukture vozila, a kompozitima inženjeri mogu odgovoriti na taj izazov i ispuniti spomenute zahtjeve. Najčešća primjena kompozita je forma polimerne matrice i ojačanja vlaknima čiji je odabir uvelike definiran njihovom cijenom. Elementi koji se zamjenjuju kompozitima su strukturni elementi, ali i niz manjih elemenata kod kojih je moguće ostvariti uštedu na masi vozila. Smanjenje mase vozila je redoviti, a možda i jedini, izbor za ostvarivanje spomenutih ciljeva, a to je upravo željena posljedica upotrebe kompozitnih materijala.

Provedena ispitivanja su pokazala da je materijal profila 1 (stakleni mat) pogodan za slučajeve kod dominantnog savojnog opterećenja, no ne u obliku presjeka koji je korišten u radu. Materijal profila 2 (kombinacija stakleno vlakno i mat) ima izvrsna svojstva žilavosti no loša savojna svojstva, te je njegova primjena opravdana kod konstrukcija koje su dominantno jednosmjerno opterećene. Materijal profila 3 (kombinacija ugljična tkanina, staklena tkanina i stakleni mat) se pokazao kao dobar kompromis rasteznih i savojnih svojstava te žilavosti, a u obliku presjeka odabranom u radu također pokazuje dobar rezultat, no njegova je cijena bitan utjecaj za njegovu primjenu..

Razvoj novih kompozita i njihovih elemenata sasvim sigurno će u budućnosti biti veliki interes proizvođača vozila, ali i društva općenito.

## 8. LITERATURA

- [1] Stein, W.E., Mannolini F, Hernick LV, Landing E, Berry CM. Giant cladoxylopsid trees resolve the enigma of the Earth ' s earliest forest stumps at Gilboa. 04.2021.
- [2] <https://www.mar-bal.com/language/en/applications/history-of-composites/> [Internet]. Available from: <https://www.mar-bal.com/language/en/applications/history-of-composites/>, 4.2021.
- [3] <http://compositeslab.com/composites-101/history-of-composites/>, travanj 2021.
- [4] Filetin T, Kovačiček F, Indorf J. Svojstva i primjena materijala., Zagreb, FSB, 2019.
- [5] Pilipović A. Prerada kompozitnih tvorevina - nastavni materijal.
- [6] Chawla N, Chawla KK. Metal-Matrix Composites in Ground Transportation., JOM, 2010;2004–7.
- [7] Kozarac, Lulić M. Konstrukcije motora., Zagreb, FSB, 2015.
- [8] Hoffmann MJ. Ceramic Applications in the Automotive Industry., prezentacija Karlsruhe Institute of Technology, travanj 2021.
- [9] Ceramics and Glass in Transportation. Available from: <https://ceramics.org/about/what-are-engineered-ceramics-and-glass/ceramics-and-glass-in-transportation>, travanj 2021.
- [10] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Stakleno\\_vlakno](https://hr.wikipedia.org/wiki/Stakleno_vlakno), travanj 2021.
- [11] <https://www.hacotech.com/en/composite-materials/fibreglass-mat-fibreglass-combi-mat>, travanj 2021.
- [12] <https://www.haufler.com/en/2/Home.html>, travanj 2021.
- [13] <https://www.haufler.com/>, travanj 2021.
- [14] M.Singh, M. Kumar, S. Kumar, S.K. Mohapatra, Properties of Glass Fiber Hybrid Composites A Review. :1–64.
- [15] <https://www.mantruckandbus.com/en.>,travanj 2021.
- [16] <https://www.mantruckandbus.com/en/company/glossar/composite-design-ladder-and-grid-frame.html>., travanj 2021.
- [17] Composites power efficiency in electric buses, Mary Lou Jay, <http://compositesmanufacturingmagazine.com/2020/05/composites-power-efficiency-in-electric-buses/>., travanj 2021.
- [18] <https://exelcomposites.com/composite-solutions/composites-in-transportation/bus-and-coach-profiles/>.,travanj 2021.
- [19] Team built bus bests all, John Winkel,<https://www.compositesworld.com/articles/team-built-bus-body-bests-all>. travanj 2021.
- [20] A clean technology for clean zero emission-buses,Donna Dawson<https://www.compositesworld.com/articles/a-clean-technology-for-clean-zero-emissions-buses.>, travanj 2021.
- [21] Neves P, Fernandes AA, Ferreira A, Marques AT, Correia N. Use of Composite Materials in Public Service Vehicles., 2021.

- [22] Neves PC, Ferreira AJM, Fernandes AA. LITEBUS - MODULAR LIGHTWEIGHT SANDWICH BUS CONCEPT. 2010;
- [23] Scania's NXT flexible use autonomous concept bus is built of carbon fiber, Kimberly Hoodin, <http://compositesmanufacturingmagazine.com/2019/10/scania-nxt-flexible-use-autonomous-concept-bus-is-built-of-carbon-fiber/>, .
- [24] Ning H, Pillay S, Vaidya UK. Design and development of thermoplastic composite roof door for mass transit bus. Mater Des [Internet]. 2009;30(4):983–91. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2008.06.066>, travanj 2021.
- [25] Mechanics A. Fiber Thermoplastic Bus Seat. 19(March 2006):4–10.
- [26] Mallick PK. Fiber-reinforced composites: Materials, manufacturing, and design, third edition. Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design, Third Edition. 2007. 1–621 p.
- [27] <https://exelcomposites.com/guide-to-composites/our-manufacturing-processes/>, svibanj 2021.
- [28] Park CH, Lee WI. Compression molding in polymer matrix composites [Internet]. Manufacturing Techniques for Polymer Matrix Composites (PMCs). Woodhead Publishing Limited; 2012. 47–94 p. Available from: <http://dx.doi.org/10.1533/9780857096258.1.47>
- [29] <http://www.hamcomposites.com/smc-bmc/sheet-molding-compound.html>, lipanj 2021.
- [30] West System Epoxy. Vacuum Bagging Techniques. Gougeon Brother [Internet]. 2010;1:1–56. Available from: <https://www.westsystem.com/wp-content/uploads/VacuumBag-7th-Ed.pdf>, lipanj 2021
- [31] <https://romeorim.com/rtm/>, lipanj 2021.
- [32] Horvat M. Primjena optičkog mjernog sustava za analizu šasijske bolida Formula student. FSB Zagreb 2017;65.
- [33] Goda I, L'Hostis G, Guerlain P. In-situ non-contact 3D optical deformation measurement of large capacity composite tank based on close-range photogrammetry. Opt Lasers Eng. 2019;119:37–55.
- [34] Wang X, Xie Z, Wang K, Zhou L. Research on a handheld 3D laser scanning system for measuring large-sized objects. Sensors (Switzerland). 2018;18(10).
- [35] HRN EN ISO 180-1:2004.
- [36] HRN EN ISO 5227-4:2008 Plastika – Određivanje rasteznih svojstava- 4.dio: Uvjeti ispitivanja izotropnih i anizotropnih plastičnih kompozita ojačanih vlaknima (eng. Plastics – Determination of tensile properties – Part 4: Test conditions for isotropic and .
- [37] HRN EN ISO 14125:2005 Plastični kompoziti ojačani vlaknima - Određivanje savojnih svojstava (eng. Fibre –reinforced plastic composites – Determination of flexural properties).
- [38] <http://www.aramid.eu/hybrid-aramid-fibers.html>., travanj 2021

## PRILOZI

Tablica 8. Izmjerene vrijednosti širine ispitnih tijela za određivanje žilavosti po Izodu

Ispitno tijelo	Izmjerene vrijednosti [mm]			Srednja vrijednost, $\bar{x}$ [mm]	Standardna devijacija, S [mm]
	Širina $b_1$	Širina $b_2$	Širina $b_3$	Širina $b$	
M-U-1	10,06	10,21	10,2	10,06	0,08
M-U-2	10,19	10,24	10,21	10,21	0,03
M-U-3	10,19	10,08	10,16	10,14	0,06
M-U-4	9,98	10	9,79	9,92	0,12
M-U-5	10,29	10,24	10,28	10,27	0,03
M-U-6	9,94	10,03	10,1	10,023	0,08
				<b>10,07</b>	<b>0,05</b>
MT-U-1	10,15	10,27	10,17	10,20	0,06
MT-U-2	10,18	10,1	10,29	10,19	0,10
MT-U-3	10,16	10,22	10,24	10,21	0,04
MT-U-4	10,2	10,22	10,18	10,20	0,02
MT-U-5	10,25	10,27	10,26	10,26	0,01
MT-U-6	10,3	10,21	10,13	10,21	0,09
				<b>10,22</b>	<b>0,04</b>
UMT-U-1	9,87	9,81	9,87	9,85	0,03
UMT-U-2	10,05	10,08	10,1	10,08	0,03
UMT-U-3	10,23	10,29	10,27	10,26	0,03
UMT-U-4	10,05	10,09	10,1	10,08	0,03
UMT-U-5	9,86	10,05	10,17	10,03	0,16
UMT-U-6	10,05	10,08	10,04	10,06	0,02
				<b>10,05</b>	<b>0,08</b>



Tablica 9. Izmjerene vrijednosti debljine ispitnih tijela za određivanje žilavosti po Izodu

Ispitno tijelo	Izmjerene vrijednosti [mm]			Srednja vrijednost, $\bar{x}$ [mm]	Standardna devijacija, S [mm]
	Debljina $h_1$	Debljina $h_2$	Debljina $h_3$	Debljina $h$	
M-U-1	4,97	4,7	4,75	4,81	0,14
M-U-2	4,27	4,04	4,12	4,14	0,12
M-U-3	4,3	4,11	4,32	4,24	0,12
M-U-4	4,31	3,98	3,82	4,04	0,25
M-U-5	4,46	4,31	4,19	4,32	0,14
M-U-6	4,16	4,05	4,12	4,11	0,06
				<b>4,16</b>	<b>0,10</b>
MT-U-1	4,64	4,83	4,69	4,72	0,10
MT-U-2	4,64	4,86	4,96	4,82	0,16
MT-U-3	4,5	4,59	4,5	4,53	0,05
MT-U-4	4,73	4,8	4,76	4,76	0,04
MT-U-5	4,39	4,88	4,62	4,63	0,25
MT-U-6	4,39	4,67	4,29	4,45	0,20
				<b>4,61</b>	<b>0,11</b>
UMT-U-1	3,01	3,1	3	3,04	0,06
UMT-U-2	2,86	2,98	2,96	2,93	0,06
UMT-U-3	2,9	2,91	2,99	2,93	0,05
UMT-U-4	2,88	3	2,99	2,96	0,07
UMT-U-5	3,11	3,04	3,1	3,08	0,04
UMT-U-6	3,06	2,96	2,99	3,00	0,05
				<b>3,01</b>	<b>0,01</b>

Tablica 10. Rezultati određivanja žilavosti po Izodu

Ispitno tijelo	Udarna energija [J]	Žilavost $\alpha_i$ [kJ/m <sup>2</sup> ]
M-U-1	-	-
M-U-2	4,5	106,37
M-U-3	5,05	117,37
M-U-4	4,05	101,14
M-U-5	4,2	94,67
M-U-6	4,95	120,16
Srednja vrijednost, $\bar{x}$ [mm]	4,55	107,94
Standardna devijacija, $S$ [mm]	0,443001	10,76021
MT-U-1	7,1	147,52
MT-U-2	-	-
MT-U-4	7	144,07
MT-U-5	-	-
Srednja vrijednost, $\bar{x}$ [mm]	7	144,07
Standardna devijacija, $S$ [mm]	-	-
UMT-U-1	-	-
UMT-U-2	-	-
UMT-U-3	5,55	184,35
UMT-U-4	5,1	171,12
UMT-U-5	4	129,38
UMT-U-6	4,5	148,99
Srednja vrijednost, $\bar{x}$ [mm]	4,7875	158,46
Standardna devijacija, $S$ [mm]	0,678694	24,2604

Tablica 11. Dimenzije ispitnih tijela za određivanje rasteznih svojstava

Ispitno tijelo	Izmjerene vrijednosti [mm]			Srednja vrijednost, $\bar{x}$ [mm]	Standardna devijacija, $S$ [mm]
	Širina $b1$	Širina $b2$	Širina $b3$	Širina $b$	
M-R-1	25,43	25,36	25,15	25,31	0,15
M-R-2	25,34	25,27	25,22	25,28	0,06
M-R-3	25,31	25,29	24,84	25,15	0,27
				<b>25,25</b>	<b>0,10</b>
UMT-R-1	25,26	25,38	25,31	25,32	0,06
UMT-R-2	25,08	25,02	25,03	25,04	0,03
UMT-R-3	24,98	25,04	25,1	25,04	0,06
				<b>25,13</b>	<b>0,02</b>
MT-R-1	24,9	25,13	25,23	25,09	0,17
MT-R-2	25,43	25,38	25,4	25,40	0,03
MT-R-3	24,83	24,92	24,88	24,88	0,05
				<b>25,12</b>	<b>0,08</b>
Ispitno tijelo	Debljina $h1$	Debljina $h2$	Debljina $h3$	Debljina $h$	
M-R-1	4,87	4,6	4,91	4,79	0,17
M-R-2	4,22	4,32	5,22	4,59	0,55
M-R-3	4,75	4,59	4,8	4,71	0,11
				<b>4,70</b>	<b>0,24</b>
UMT-R-1	3,04	3,09	2,91	3,01	0,09
UMT-R-2	3,55	3,38	3,24	3,39	0,16
UMT-R-3	2,88	2,9	3,01	2,93	0,07
				<b>3,11</b>	<b>0,04</b>
MT-R-1	4,66	4,75	4,89	4,77	0,12
MT-R-2	4,6	4,73	4,7	4,68	0,07
MT-R-3	4,53	4,39	4,27	4,40	0,13
				<b>4,61</b>	<b>0,03</b>

Tablica 12. Debljina ispitnih tijela za ispitivanje savojnih svojstava

Ispitno tijelo	Izmjerene vrijednosti [mm]			Srednja vrijednost, $\bar{x}$ [mm]	Standardna devijacija, $S$ [mm]
	Debljina $h1$	Debljina $h2$	Debljina $h3$	Debljina $h$	
M-S-1	4,36	4,5	4,32	4,39	0,09
M-S-2	4,67	4,41	4,61	4,56	0,14
M-S-3	4,83	4,95	4,85	4,88	0,06
M-S-4	4,5	4,55	4,43	4,49	0,06
M-S-5	4,36	4,46	4,53	4,45	0,09
M-S-6	5,13	4,98	4,85	4,99	0,14
				<b>4,63</b>	<b>0,03</b>
MT-S-1	4,43	4,47	4,7	4,53	0,15
MT-S-2	4,76	4,72	4,8	4,76	0,04
MT-S-3	4,86	4,99	5,05	4,97	0,10
MT-S-4	4,73	4,47	4,65	4,62	0,13
MT-S-5	4,61	4,57	4,68	4,62	0,06
MT-S-6	4,19	4,31	4,74	4,41	0,29
MT-S-7	5,01	4,81	4,92	4,91	0,10
MT-S-8	5,5	5,29	5,09	5,29	0,21
				<b>4,76</b>	<b>0,08</b>
UMT-S-1	2,81	2,84	2,71	2,79	0,07
UMT-S-2	2,75	2,79	2,81	2,78	0,03
UMT-S-3	2,83	2,95	2,87	2,88	0,06
UMT-S-4	2,82	2,83	2,92	2,86	0,06
				<b>2,83</b>	<b>0,02</b>

Tablica 13. Širina ispitnih tijela za ispitivanje savojnih svojstava

Ispitno tijelo	Izmjerene vrijednosti [mm]			Srednja vrijednost, $\bar{x}$ [mm]	Standardna devijacija, $S$ [mm]
	Širina $b1$	Širina $b2$	Širina $b3$	Širina $b$	
M-S-1	14,28	14,29	14,3	14,29	0,01
M-S-2	14,81	14,95	14,97	14,91	0,09
M-S-3	15,16	15,13	15,07	15,12	0,05
M-S-4	13,69	13,67	13,7	13,68666667	0,02
M-S-5	13,21	13,24	13,25	13,23333333	0,02
M-S-6	15,04	15,19	15,17	15,13333333	0,08
				<b>14,40</b>	<b>0,03</b>
MT-S-1	14,62	14,76	14,75	14,71	0,08
MT-S-2	14,69	14,74	14,62	14,68	0,06
MT-S-3	15,14	14,98	15,05	15,06	0,08
MT-S-4	14,65	14,61	14,69	14,65	0,04
MT-S-5	15,04	15,03	15,02	15,03	0,01
MT-S-6	14,82	14,84	14,8	14,82	0,02
MT-S-7	15,01	14,96	15	14,99	0,03
MT-S-8	14,81	14,87	14,85	14,84	0,03
				<b>14,85</b>	<b>0,03</b>
UMT-S-1	15,1	15,04	15,12	15,09	0,04
UMT-S-2	15,1	15,04	15,13	15,09	0,05
UMT-S-3	15,09	15	15,1	15,06	0,06
UMT-S-4	15,11	15,12	15,16	15,13	0,03
				<b>15,09</b>	<b>0,01</b>

Tablica 14. Rezultati ispitivanja savojnih svojstava UMT ispitnih tijela

Ispitno tijelo	Maksimalna sila	Savojna čvrstoća	Savojni modul elastičnosti
	[N]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N]
UMT-S-4	282,882	274,294	23798,6
UMT-S-3	266,504	274,225	22766,1
UMT-S-2	332,853	319,76	23179,9
UMT-S-1	271,324	277,186	22734
Srednja vrijednost	288,391	286,366	23119,7
Standardna devijacija	30,423	22,31	496,094

Tablica 15. Rezultati ispitivanja savojnih svojstava M ispitnih tijela

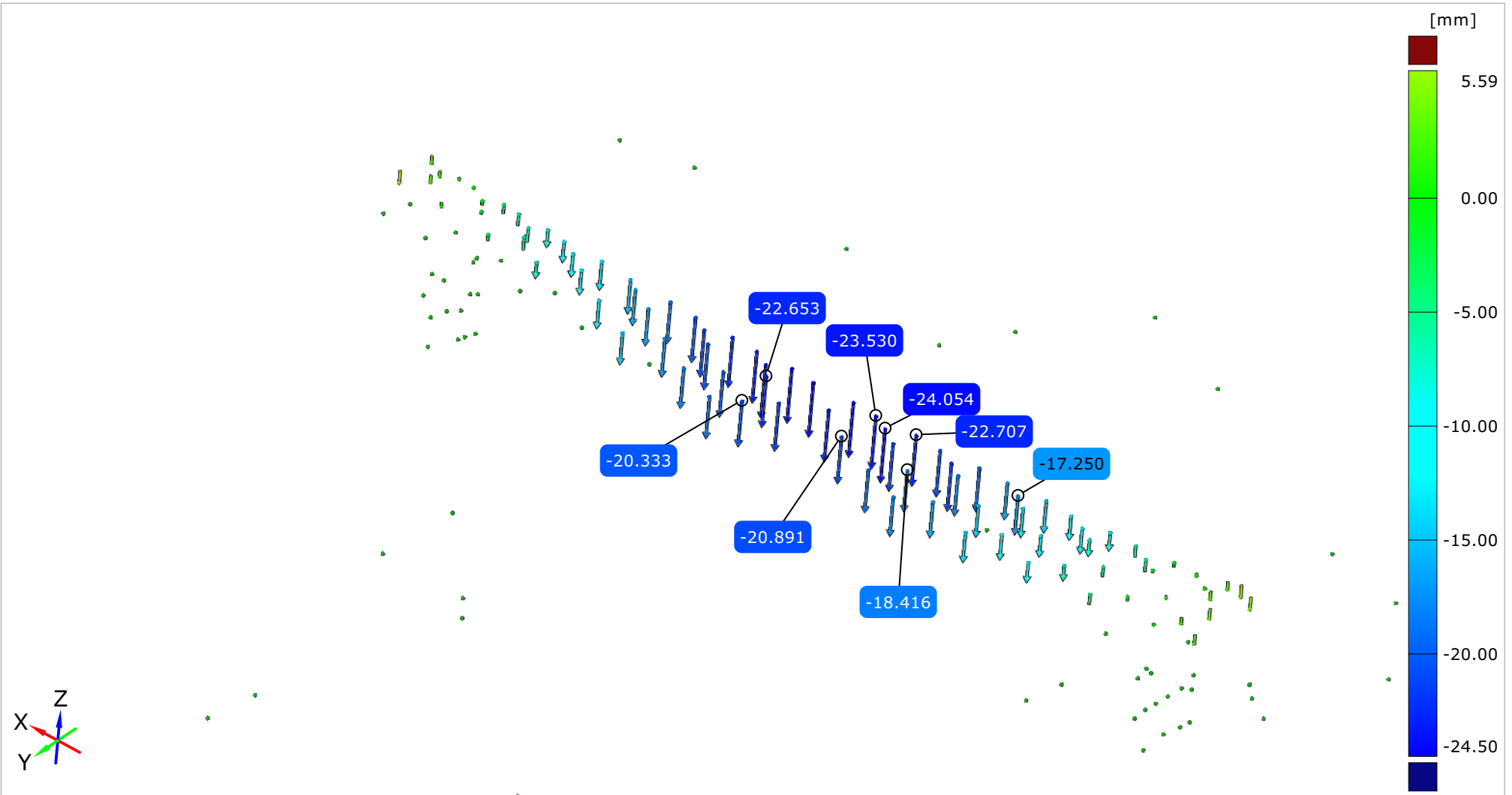
Ispitno tijelo	Maksimalna sila	Savojna čvrstoća	Savojni modul elastičnosti
	[N]	[N/mm]	[N]
M-S-4	622,35	216,48	6578,75
M-S-5	535,998	196,406	7103,13
M-S-6	868,713	222,254	7759,89
M-S-1	540,064	188,259	6345,77
M-S-2	764,527	236,732	7570,58
M-S-3	901,699	240,404	7754,56
Srednja vrijednost	705,558	216,755	7185,45
Standardna devijacija	162,253	21,0465	613,534

Tablica 16. Rezultati ispitivanja savojnih svojstava MT ispitnog tijela

Ispitno tijelo	Maksimalna sila	Savojna čvrstoća	Savojni modul elastičnosti
	[N]	[N/mm]	[N]
MT-S-4	909,91	174,594	4420,32
MT-S-6	721,571	150,212	3292,1
MT-S-1	716,562	142,428	4649,63
MT-S-2	811,229	146,337	4339,86
MT-S-7	632,798	105,064	3679,14
Srednja vrijednost	758,414	143,727	4076,21
Standardna devijacija	105,628	24,991	567,721

# Profil 1 opterećenje 100 kg pomak duž vertikalne (z) osi

Stage 6



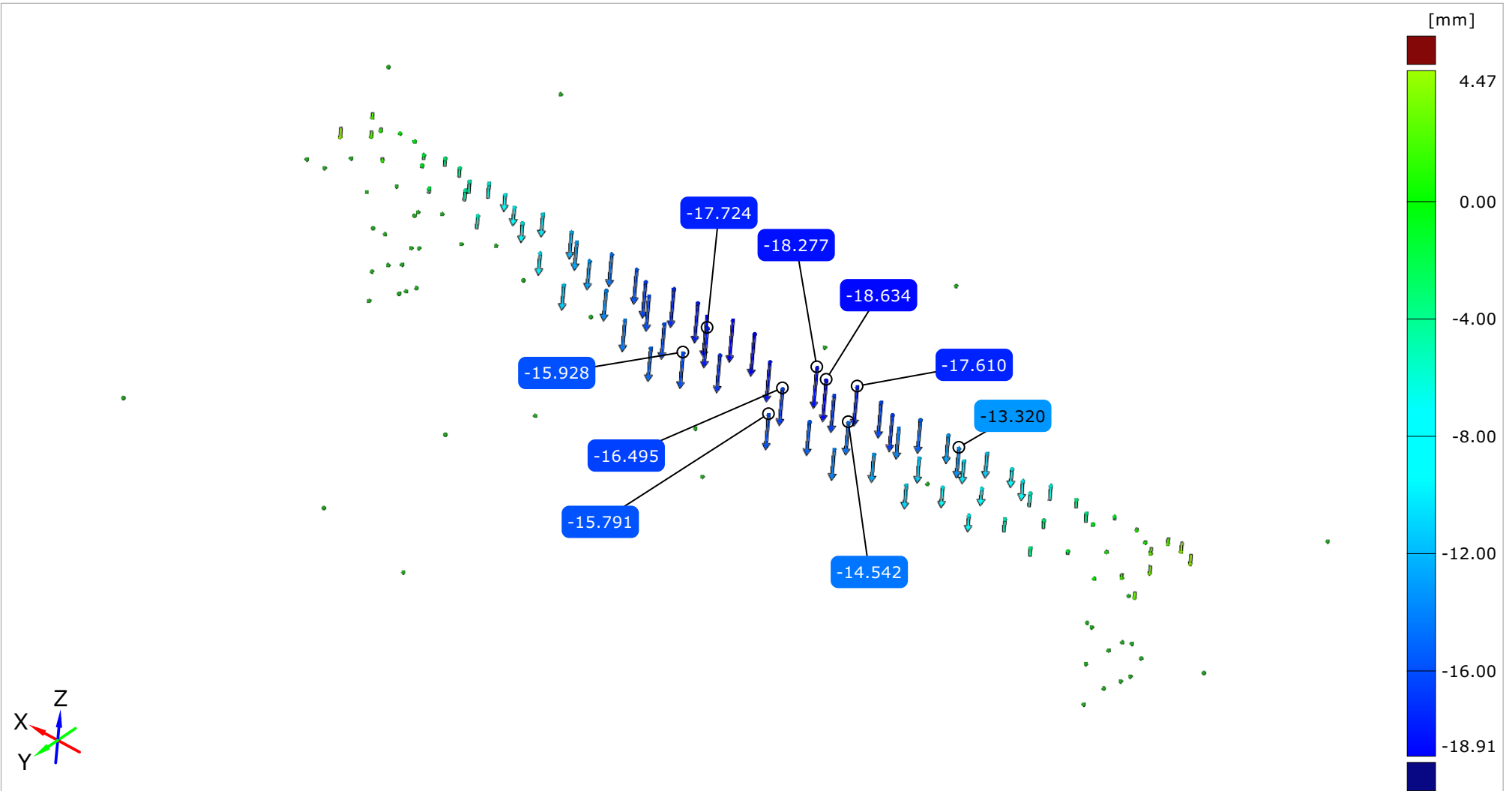
Alignment cross 1

Length unit: mm



### Profil 1 opterećenje 80 kg pomak duž vertikalne (z) osi

Stage 5

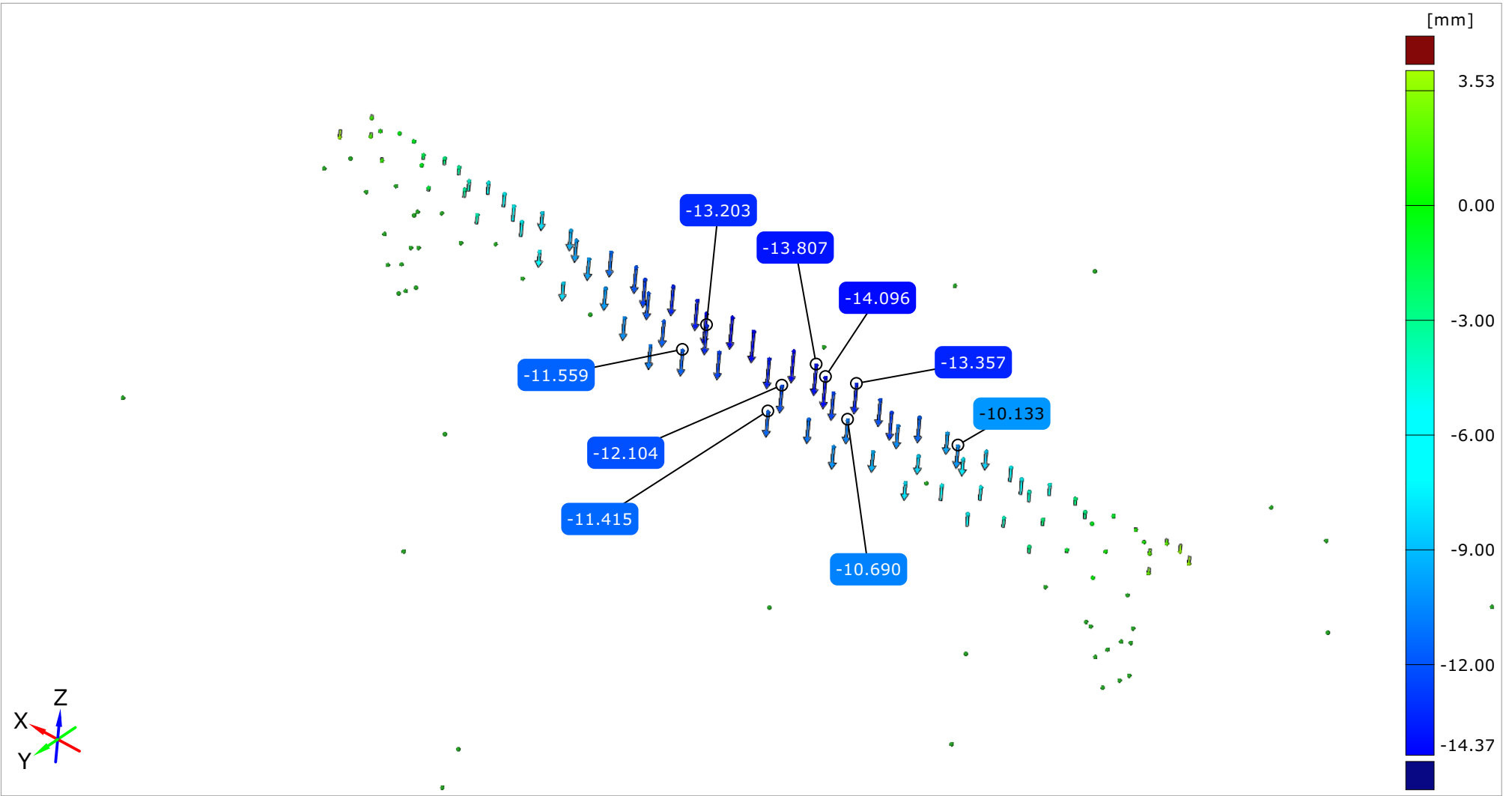


Alignment cross 1

Length unit: mm

### Profil 1 opterećenje 60 kg pomak duž vertikalne (z) osi

Stage 4

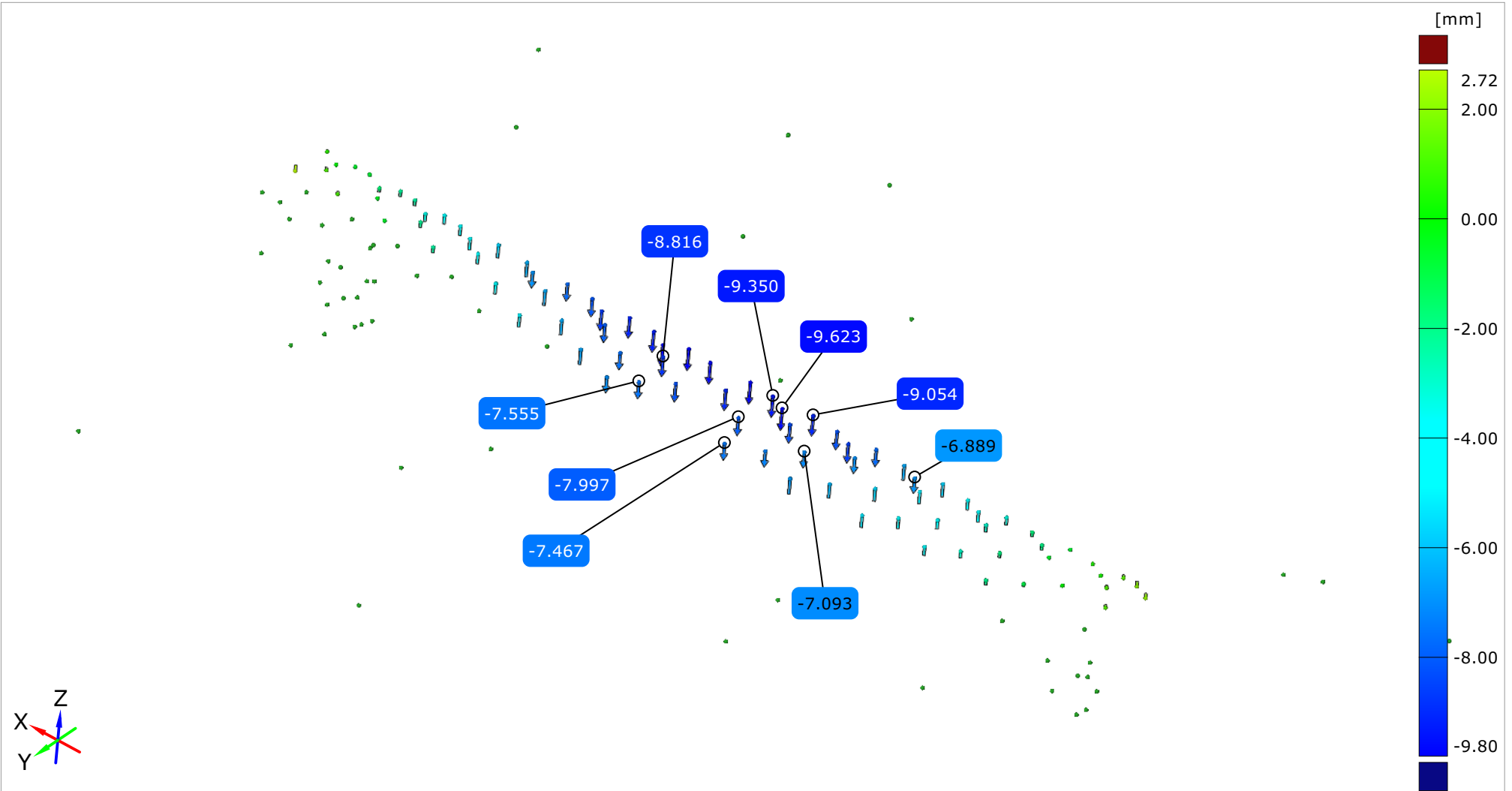


Alignment cross 1

Length unit: mm

### Profil 1 opterećenje 40 kg pomak duž vertikalne (z) osi

Stage 3

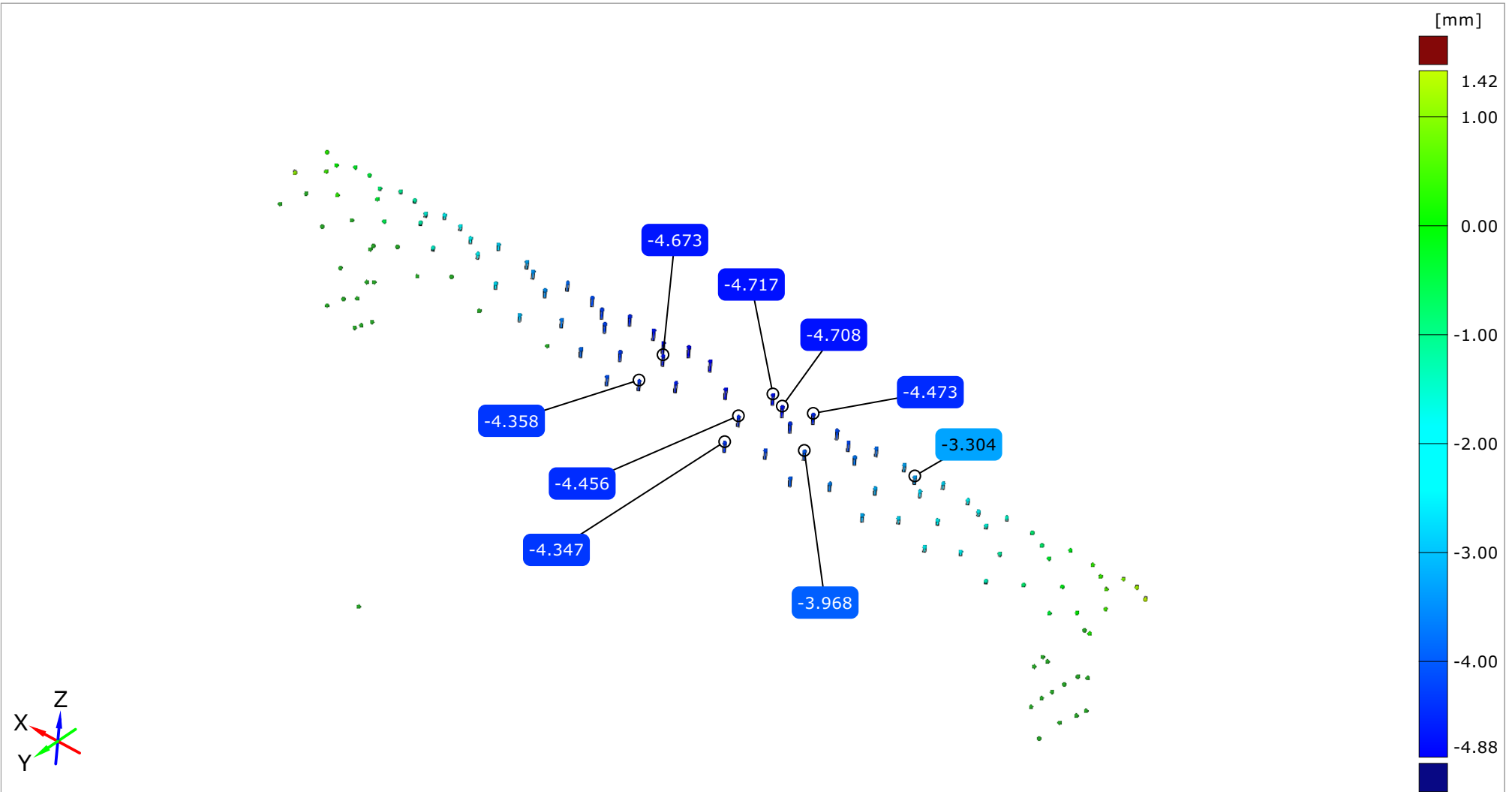


Alignment cross 1

Length unit: mm

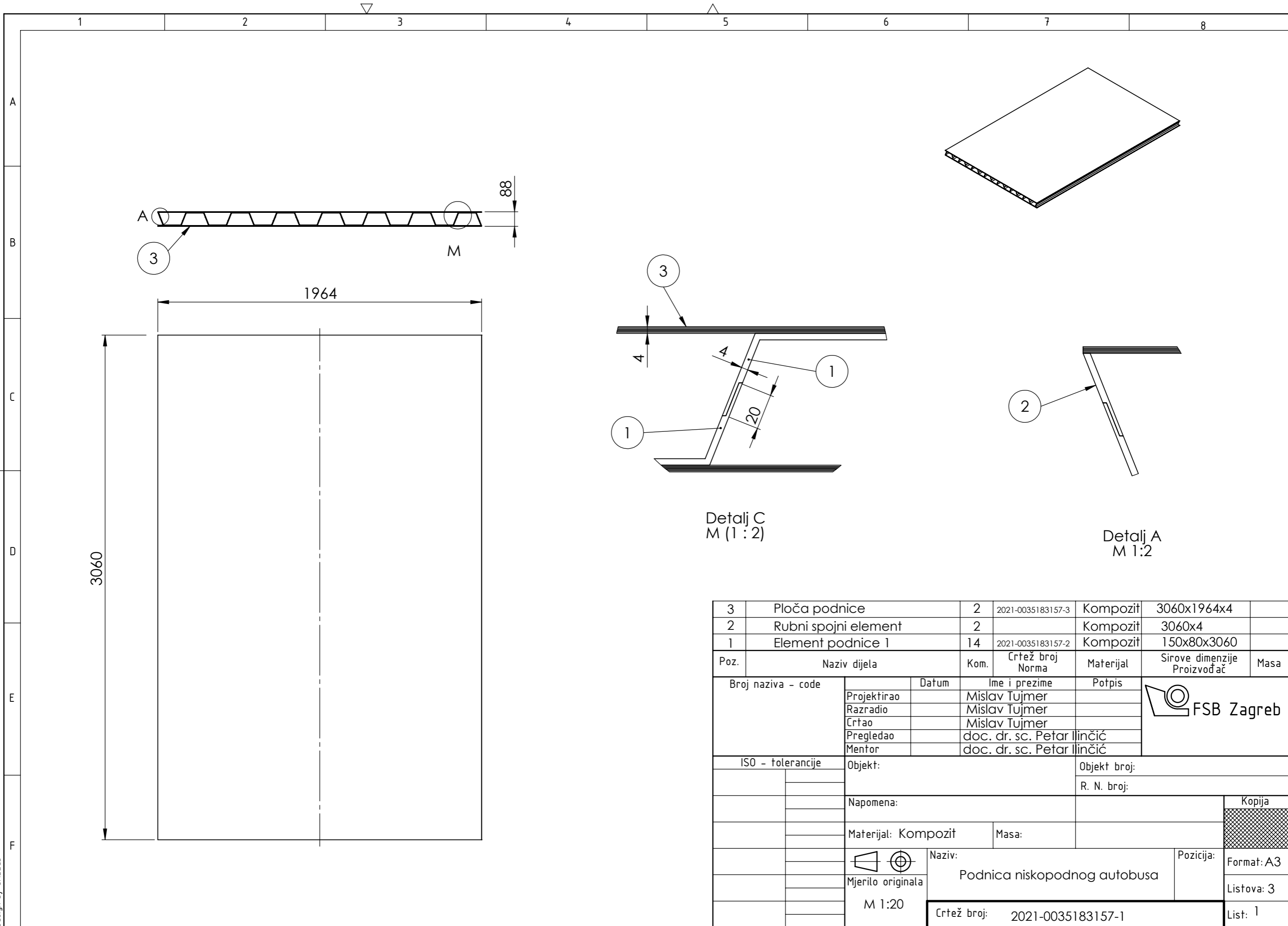
### Profil 1 opterećenje 20 kg pomak duž vertikalne (z) osi

Stage 2



Alignment cross 1

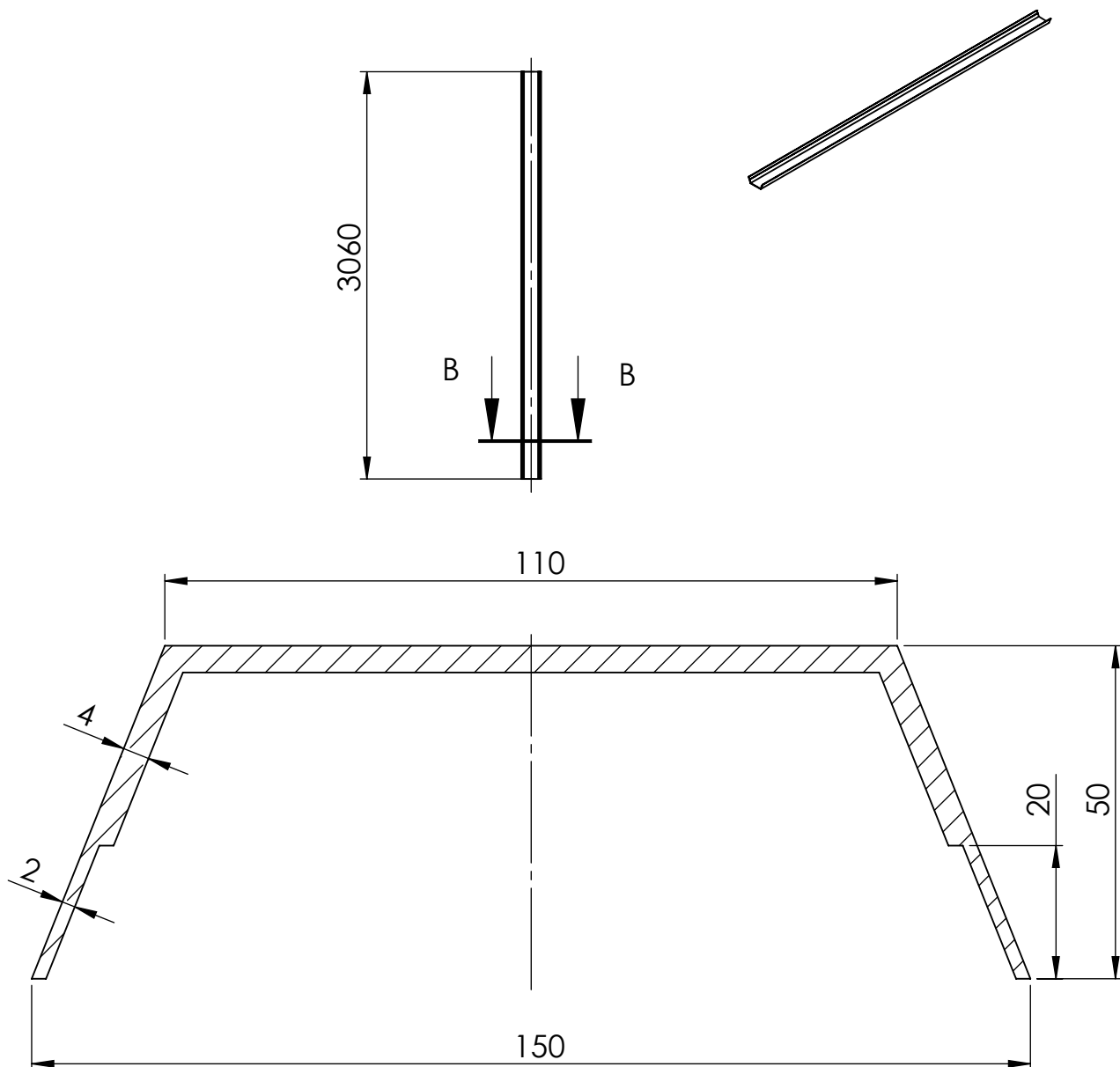
Length unit: mm




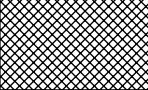


Detalj C  
M (1 : 2)

Detalj A  
M 1:2

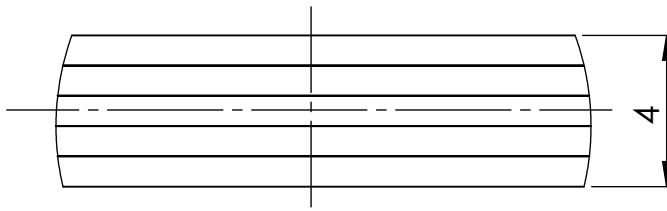
3	Ploča podnice	2	2021-0035183157-3	Kompozit	3060x1964x4	
2	Rubni spojni element	2		Kompozit	3060x4	
1	Element podnice 1	14	2021-0035183157-2	Kompozit	150x80x3060	
Poz.	Naziv dijela	Kom.	Crtež broj Norma	Materijal	Sirove dimenzije Proizvođač	Masa
Broj naziva - code		Datum	Ime i prezime		Potpis	
Projektirao			Mislav Tujmer			
Razradio			Mislav Tujmer			
Crtao			Mislav Tujmer			
Pregledao			doc. dr. sc. Petar Ilinčić			
Mentor			doc. dr. sc. Petar Ilinčić			
ISO - tolerancije		Objekt:			Objekt broj:	
					R. N. broj:	
		Napomena:			<div style="border: 1px solid black; width: 100%; height: 100%; background-color: #cccccc; text-align: center;">Kopija</div>	
		Materijal: Kompozit				
					Naziv: Podnica niskopodnog autobusa	
		Mjerilo originala			Pozicija: Format: A3	
		M 1:20			Listova: 3	
		Crtež broj: 2021-0035183157-1			List: 1	



Presjek B-B  
M (1 : 1)

	Datum	Ime i prezime	Potpis	 <b>FSB Zagreb</b>
Projektirao		Mislav Tujmer		
Razradio		Mislav Tujmer		
Crtao		Mislav Tujmer		
Pregledao		doc. dr. sc. Petar Ilinčić		
Objekt: Podnica niskopodnog autobusa			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:				Kopija
Materijal: Kompozit			Masa:	
		Naziv: Element podnice		Pozicija: 1
Mjerilo originala 1:20		Crtež broj: 2021-0035183157-2		Format: A4 Listova: 3 List: 2

Detalj B  
M 5:1



B

1964

3060

	Datum	Ime i prezime	Potpis	 <b>FSB Zagreb</b>
Projektirao		Mislav Tujmer		
Razradio		Mislav Tujmer		
Crtao		Mislav Tujmer		
Pregledao		doc. dr. sc. Petar Ilinčić		
Objekt: Podnica niskopodnog autobusa			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena: Laminat od 5 slojeva (detalj B)				Kopija
Materijal:	Kompozit	Masa:		
 Mjerilo originala	Naziv:		Pozicija:	Format: A4
	1 : 20		Ploča podnice	3
Crtež broj: 2021-0035183157-3				List: 3