

Eksperimentalna analiza i numeričko modeliranje mehaničkih svojstava hibridnih kompozita

Lončar, Lucija

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:183461>

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

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

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Lucija Lončar

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Tatjana Haramina, dipl. ing.

Student:

Lucija Lončar

Zagreb, 2024.

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

Ovom prilikom željela bih zahvaliti mentorici prof. dr. sc. Tatjani Haramini te izv. prof. dr. sc. Darku Ivančeviću na pomoći i savjetima tijekom pisanja rada. Također, zahvaljujem i tehničkom suradniku Božidaru Bušetinčanu, koji je pomogao kod eksperimentalnog dijela ovog rada, kao i tehničkoj suradnici Mireli Petranović na pomoći oko svladavanja Trapezium X softvera. Velike zahvale mojoj obitelji i prijateljima na strpljenju, ljubavi i vjeri u mene. Na kraju hvala i mom djedu, koji mi je najveća snaga i inspiracija.

Lucija Lončar



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija

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

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Lucija Lončar**

JMBAG: 0035220961

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Eksperimentalna analiza i numeričko modeliranje mehaničkih svojstava hibridnih kompozita**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Experimental analysis and numerical modeling of mechanical properties of hybrid composites**

Opis zadatka:

Lanena vlakana dobivaju se iz obnovljivih izvora, razgradljiva su, a za njihovu proizvodnju manji je utrošak energije u odnosu na proizvodnju uobičajenih staklenih vlakana, što ih čini prihvatljivijim materijalom ojačala. Njihova mehanička svojstva usporediva su sa svojstvima staklenih vlakana, međutim slabija adhezija s polimernom matricom ograničava prijenos opterećenja s matrice na ojačalo, što posebno dolazi do izražaja pri savijanju. Jedno od mogućih poboljšanja je hibridiziranje sa staklenim vlaknima.

Potrebno je ispitati na kidalici savojna i rastezna svojstva pet hibridnih kompozita ojačanih staklenim (S) i lanenim (L) vlaknima slaganih u šest slojeva sa sljedećim rasporedom: SLLLLS, LSLLSL, LLSSLL, LLLLLL i SSSSSS. Rezultate evaluirati uz pomoć softvera Trapezium X kojim se ujedno kontroliraju i sama mjerenja, a potom provesti numeričko modeliranje uz pomoć softvera Abaqus/Standard.

U radu je potrebno:

- odrediti dimenzije ispitnih tijela za savojno ispitivanje u ovisnosti o debljini ploča i tipu vlakana, te provesti ispitivanja u skladu s normom HRN EN ISO 14125:2005
- ispitati utjecaj redosljeda slaganja vlakana na čvrstoću i modul pri savijanju
- za numeričku simulaciju metodom konačnih elemenata, ispitati čvrstoću i modul pri rasteznom opterećenju prema normi HRN EN ISO 527-4:2022
- primijeniti prikladne vrste konačnih elemenata, načine diskretizacije kompozitnih ploča i pronaći odgovarajući materijalni model za analizu savojnih svojstava, odnosno u slučaju da ne postoji odgovarajući model pronaći zadovoljavajuću aproksimaciju.

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

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

18. siječnja 2024.

21. ožujka 2024.

25. – 29. ožujka 2024.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof.dr.sc. Tatjana Haramina

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD.....	1
1.1. Kompoziti ojačani sintetskim vlaknima.....	3
1.2. Kompoziti ojačani prirodnim vlaknima	4
1.3. Hibridni kompoziti	7
1.4. Pregled literature	9
2. CILJEVI RADA	12
3. MATERIJALI I METODE.....	14
3.1. Izrada kompozitnih ploča.....	14
3.2. Rastezno ispitivanje	19
3.3. Savojno ispitivanje.....	23
3.4. Simulacija rasteznog ispitivanja.....	26
3.5. Simulacija savojnog ispitivanja.....	28
4. REZULTATI I RASPRAVA.....	31
4.1. Rezultati rasteznog ispitivanja	31
4.2. Rezultati savojnog ispitivanja	39
4.3. Rezultati simulacije za rastezno i savojno ispitivanje.....	46
4.4. Usporedba numeričke simulacije i eksperimenta za rastezno ispitivanje	48
4.5. Usporedba numeričke simulacije i eksperimenta za savojno ispitivanje	52
5. Dodatne prilagodbe materijalnih modela na temelju literature	56
5.1. Dodatna literatura.....	56
5.2. Rezultati simulacija rasteznog ispitivanja na temelju dodatnih ispitivanja	58
6. ZAKLJUČAK.....	63
LITERATURA.....	65

POPIS SLIKA

Slika 1.	Podjela vlakana za ojačanje kompozita [5]	2
Slika 2.	Različiti načini tkanja vlakana: a) tkanje košarice (e. <i>basket</i>); b) obično platneno tkanje (e. <i>plain</i>); c) keper (e. <i>satın</i>); d) atlas (e. <i>twill</i>); e) prošiveno tkanje pod kutom $\pm 45^\circ$ (e. <i>weave & stitch</i>) [6]	3
Slika 3.	Analiza upotrebe pojedinih dijelova biljke [10]	5
Slika 4.	SWOT analiza kompozita ojačanih prirodnim vlaknima [10]	7
Slika 5.	Rastezna (vlačna) čvrstoća i modul elastičnosti kompozita s fenolnom matricom ojačani lanenim i staklenim vlaknima [9]	9
Slika 6.	Shematski prikaz postupka ručnog polaganja [34].....	15
Slika 7.	Tkanje staklenih vlakana (e. <i>woven</i>)	15
Slika 8.	Tkanina lanenih vlakana pod kutom $\pm 45^\circ$	16
Slika 9.	Ručno polaganje: a) nanošenje smole, b) ploča spremna za polimerizaciju	16
Slika 10.	Izrezivanje ispitnih tijela za rastezno ispitivanje kružnom pilom	17
Slika 11.	Ispitna tijela za rastezno ispitivanje: a) ploča SLLLLS ; b) ploča LSLLSL; c) ploča LLSSLL; d) ploča SSSSSS; e) ploča LLLLLL	21
Slika 12.	Kidalica Shimadzu AGS-X	22
Slika 13.	Ispitno tijelo u čeljustima kidalice s postavljenim ekstenzometrom	22
Slika 14.	Ispitna tijela nakon provedenog rasteznog ispitivanja.....	23
Slika 15.	Savojno ispitivanje u tri točke [36]	24
Slika 16.	Ispitna tijela prije ispitivanja: a) ploča SLLLLS, b) ploča LSLLSL, c) ploča LLSSLL, d) ploča SSSSSS, e) ploča LLLLLL	25
Slika 17.	Ispitno tijelo na osloncima u kidalici.....	25
Slika 18.	Ispitna tijela nakon provedenog savojnog ispitivanja: a) ploča SLLLLS, b) ploča LSLLSL, c) ploča LLSSLL, d) ploča SSSSSS, e) ploča LLLLLL	26
Slika 19.	Mreža elemenata ispitnog tijela za rastezno ispitivanje od epoksidne smole ojačane lanenim vlaknima, dimenzije su u [mm]	28
Slika 20.	Rubni uvjeti i zadani pomak u simulaciji rasteznog ispitivanja	28
Slika 21.	Mreža elemenata ispitnog tijela za savojno ispitivanje epoksidne smole ojačane lanenim vlaknima, dimenzije su u [mm]	29
Slika 22.	Mreža elemenata oslonaca i valjka za opterećivanje, dimenzije su u [mm]	30
Slika 23.	Rubni uvjeti i zadani pomak numeričkog modela za savojno ispitivanje, prikazana je epruveta za lan, dimenzije su u [mm].....	30

Slika 24.	Dijagrami rastezno naprezanje-istezanje za SSSSSS ploču	33
Slika 25.	Dijagrami rastezno naprezanje-istezanje za LLLLLL ploču.....	34
Slika 26.	Dijagrami rastezno naprezanje-istezanje za SLLLLS ploču	35
Slika 27.	Dijagrami rastezno naprezanje-istezanje za LSLLSL ploču	36
Slika 28.	Dijagrami rastezno naprezanje-istezanje za LLSSLL ploču	37
Slika 29.	Dijagrami rastezno naprezanje-istezanje za pojedine ploče	38
Slika 30.	Dijagrami savojno naprezanje-istezanje za SSSSSS ploču	41
Slika 31.	Dijagrami savojno naprezanje-istezanje za LLLLLL ploču.....	42
Slika 32.	Dijagrami savojno naprezanje-istezanje za SLLLLS ploču	43
Slika 33.	Dijagrami savojno naprezanje-istezanje za LSLLSL ploču	44
Slika 34.	Dijagrami savojno naprezanje-istezanje za LLSSLL ploču	45
Slika 35.	Dijagrami savojno naprezanje-istezanje za pojedine ploče.....	46
Slika 36.	Raspodjela a) deformacije [mm/mm] i b) naprezanja [MPa] u prvom sloju (L) kod rasteznog ispitivanja za ispitno tijelo s rasporedom slojeva LSLLSL	47
Slika 37.	Raspodjela a) deformacije [mm/mm] i b) naprezanja [MPa] u prvom sloju (L) kod savojnog ispitivanja za ispitno tijelo s rasporedom slojeva LLSSLL uz prikaz debljine uz vizualizaciju debljine ljuskastog konačnog elementa.....	48
Slika 38.	Usporedba dijagrama rastezno naprezanje-istezanje u Abaqusu i Trapeziumu za ploču SLLLLS	49
Slika 39.	Usporedba dijagrama rastezno naprezanje-istezanje u Abaqusu i Trapeziumu za ploču LSLLSL	49
Slika 40.	Usporedba dijagrama rastezno naprezanje-istezanje u Abaqusu i Trapeziumu za ploču LLSSLL	50
Slika 41.	Usporedba dijagrama rastezno naprezanje-istezanje u Abaqusu i Trapeziumu za ploču SSSSSS	51
Slika 42.	Usporedba dijagrama rastezno naprezanje-istezanje u Abaqusu i Trapeziumu za ploču LLLLLL.....	51
Slika 43.	Usporedba dijagrama savojno naprezanje-istezanje u Abaqusu i Trapeziumu za ploču SLLLLS	52
Slika 44.	Usporedba dijagrama savojno naprezanje-istezanje u Abaqusu i Trapeziumu za ploču LSLLSL	53
Slika 45.	Usporedba dijagrama savojno naprezanje-istezanje u Abaqusu i Trapeziumu za ploču LLSSLL	53

Slika 46.	Usporedba dijagrama savojno naprezanje-istezanje u Abaqusu i Trapeziumu za ploču SSSSSS.....	54
Slika 47.	Usporedba dijagrama savojno naprezanje-istezanje u Abaqusu i Trapeziumu za ploču LLLLLL.....	55
Slika 48.	Usporedba dijagrama rastezno naprezanje-istezanje u Abaqusu i Trapeziumu za ploču s četiri sloja lanenih vlakana iz literature [40].....	58
Slika 49.	Usporedba dijagrama rastezno naprezanje-istezanje u Abaqusu i Trapeziumu za ploču sa šest slojeva lanenih vlakana iz literature [39]	59
Slika 50.	Usporedba dijagrama rastezno naprezanje-istezanje u Abaqusu i Trapeziumu za ploču sa sedam slojeva lanenih vlakana iz literature [39]	60
Slika 51.	Usporedba dijagrama rastezno naprezanje-istezanje u Abaqusu i Trapeziumu za ploču sa šest slojeva lanenih vlakana iz literature [41]	61
Slika 52.	Usporedba dijagrama rastezno naprezanje-istezanje u Abaqusu i Trapeziumu za ploču s četiri sloja staklenih vlakana iz literature [41]	62

POPIS TABLICA

Tablica 1. Svojstva različitih tipova sintetskih vlakana [8].....	4
Tablica 2. Svojstva različitih tipova prirodnih vlakana [9]	5
Tablica 3. Dimenzije ispitnih tijela za rastezno ispitivanje	17
Tablica 4. Dimenzije ispitnih tijela za savojno ispitivanje.....	18
Tablica 5. Maseni udjeli pojedinih vlakana.....	19
Tablica 6. Mehanička svojstva modeliranih materijala	27
Tablica 7. Svojstva za model plastičnosti s izotropnim očvrnućem	27
Tablica 8. Podaci o konačnim elementima za pojedine modele.....	29
Tablica 9. Svojstva dobivena rasteznim ispitivanjem	31
Tablica 10. Svojstva dobivena savojnim ispitivanjem	39
Tablica 11. Podaci o srednjoj debljini ispitnih tijela te srednjim vrijednostima mehaničkih svojstava dobivenih rasteznim ispitivanjem [40]	56
Tablica 12. Podaci o srednjoj debljini ispitnih tijela te srednjim vrijednostima mehaničkih svojstava dobivenih rasteznim ispitivanjem [41]	57
Tablica 13. Podaci o srednjoj debljini ispitnih tijela te srednjim vrijednostima mehaničkih svojstava dobivenih rasteznim ispitivanjem [42]	58

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	mm ²	Površina
B_r	mm	Širina šireg dijela ispitnog tijela za rastezno ispitivanje
b	mm	Širina ispitnog tijela
b_r	mm	Širina užeg dijela ispitnog tijela za rastezno ispitivanje
b_{sr}	mm	Srednja vrijednost širine ispitnog tijela
d_r	mm	Duljina šireg dijela ispitnog tijela za rastezno ispitivanje
E	MPa	Rastezni modul elastičnosti
E_1	MPa	Modul elastičnosti u smjeru glavne materijalne osi 1
E_2	MPa	Modul elastičnosti u smjeru glavne materijalne osi 2
E_f	MPa	Savojni modul elastičnosti
F	N	Sila
F_{max}	N	Maksimalna sila
f	mm	Progib
G	MPa	Modul smičnosti
$G_{ij}, i, j = 1, 2, 3$	MPa	Moduli smičnosti s obzirom na glavne materijalne osi
h	mm	Debljina ispitnog tijela
h_{sr}	mm	Srednja vrijednost debljine
l_o	mm	Razmak između oslonaca
l_r	mm	Ukupna duljina ispitnog tijela za rastezno ispitivanje
$l_{r,0}$	mm	Duljina mjernog područja
$l_{r,c}$	mm	Duljina užeg dijela ispitnog tijela za rastezno ispitivanje
l_s	mm	Duljina ispitnog tijela za savojno ispitivanje
Δl	mm	Pomak ispitnog tijela kod rasteznog ispitivanja
Δl_k	mm	Konačan pomak ispitnog tijela kod rasteznog ispitivanja
m_p	g	Masa ploče
m_{vl}	g	Masa vlakana
R_1	mm	Promjer valjka za opterećivanje
R_2	mm	Promjer oslonaca

w	%	Maseni udio
ε	%	Deformacija
ε_k	%	Prekidno istezanje
ε_{ks}	%	Prekidno istezanje uslijed savojnog naprezanja
ε_{kr}	%	Prekidno istezanje uslijed rasteznog naprezanja
ν	/	Poissonov faktor
ν_{12}	/	Poissonov faktor s obzirom na glavne materijalne osi 1 i 2
ρ	g cm ⁻³	Gustoća
σ	MPa	Naprezanje
σ_f	MPa	Savojna čvrstoća
σ_m	MPa	Rastezna čvrstoća

SAŽETAK

U sklopu rada pripravljeni su kompoziti epoksid/staklo i epoksid/lan, te tri hibridna kompozita epoksid/lan/staklo s različitim redoslijedom slaganja vlakana. Provedena su eksperimentalna ispitivanja pri rasteznom i savojnom opterećenju kako bi se utvrdilo kakav je utjecaj redoslijeda slaganja na mehanička svojstva. Dobiveni rezultati korišteni su za validaciju numeričkih modela rasteznih i savojnih ispitivanja. Provedena je numerička simulacija metodom konačnih elemenata Abaqus/Standard koristeći prikladne vrste konačnih elemenata, načine diskretizacije kompozitnih ploča i materijalnih modela. Epoksidna smola ojačana staklenim vlaknima modelirana je kao linearno elastičan ortotropan materijal, dok je epoksidna smola ojačana lanenim vlaknima modelirana kao izotropno elastičan materijal uz model plastičnosti, kako bi se bolje simuliralo ponašanje stvarnog materijala. Iz dobivenih rezultata može se zaključiti da numeričke simulacije dobro prate eksperimentalna ispitivanja te da se mogu koristiti u modeliranju različitih kombinacija rasporeda slojeva. Pretpostavka da će u usporedbi s ostalim hibridima, kompozit sa staklenim vlaknima u vanjskim slojevima pri savojnom opterećenju imati najviši modul i čvrstoću, nije se pokazala točnom, naročito u pogledu čvrstoće, dok se kompozit sa staklenim vlaknima u sredini, blizini neutralne ravnine, ponašao očekivano najlošije.

Ključne riječi: hibridni kompoziti, lanena vlakna, MKE, savojno ispitivanje, rastezno ispitivanje

SUMMARY

In this study, composites epoxy/glass, epoxy/ flax and three hybrid composites epoxy/flax/glass with different stacking sequences of fiber reinforcement layers were prepared. The effect of the fiber stacking sequence on mechanical properties was tested under tensile and flexural load. The obtained results were used to validate numerical models of tensile and bending tests. Numerical simulations were performed using the finite element method Abaqus/Standard, using appropriate types of finite elements, discretization methods of composite plates, and material models. The epoxy resin reinforced with glass fibers was modeled as a linear elastic orthotropic material, while the epoxy resin reinforced with flax fibers was modeled as an isotropic elastic material with a plasticity model to better simulate the behavior of the real material. From the obtained results, it can be concluded that numerical simulations follow experimental tests well and can be used to model different combinations of fiber stacking orientations. The assumption that the hybrid composite with glass fibers in the outer layers will be superior to other hybrids under flexural load has not been proven to be correct, whereas the one with glass fibers next to the middle neutral plane was the weakest as expected.

Keywords: hybrid composites, flax fibers, FEM, bending test, tensile test

1. UVOD

Kompozitni materijali postali su neizostavan element modernog inženjerstva, zahvaljujući svojim izvanrednim svojstvima, poput visoke čvrstoće i krutosti, korozijske postojanosti i male gustoće koja posjeduju u usporedbi s tradicionalnim materijalima. Svoju primjenu pronalaze u raznim granama industrije uključujući zrakoplovno inženjerstvo i svemirsku tehniku, brodogradnju te automobilsku industriju.

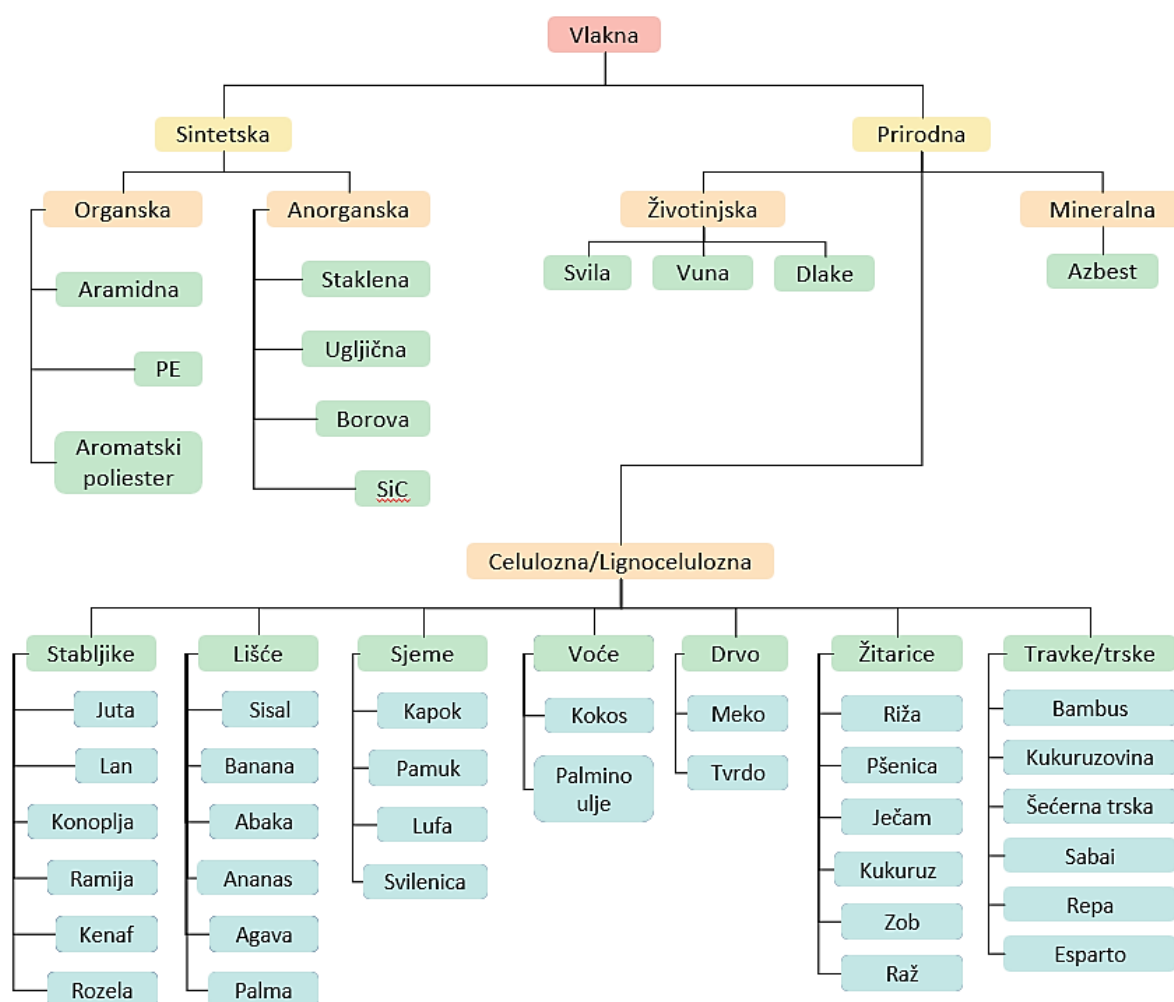
S vremenom su se počeli postavljati sve veći zahtjevi na svojstva i primjenu kompozitnih materijala što je dovelo do razvoja hibridnih kompozita. Ime su dobili po korištenju kombinacije dvije ili više vrsta ojačala u univerzalnoj matrici, s ciljem postizanja optimalnih svojstava. Problemi kohezije matrice i ojačala često se vežu uz kompozite, a pri proizvodnji hibridnih kompozita ovaj problem još više dolazi do izražaja [1]. Većinu materijala vlakana u kompozitima čine sintetska vlakna, poput staklenih, aramidnih i ugljičnih. No, u današnje vrijeme sve veće ekološke osviještenosti te pojave zelenih koncepata, kompoziti ojačani prirodnim vlaknima, postaju sve popularniji jer, osim što donose benefite za okoliš, zadržavaju i dobra mehanička svojstva. Iako trenutno ne predstavljaju adekvatnu zamjenu za sve primjene, kompenzacija se pronalazi upravo u hibridnim kompozitima, gdje se kombiniraju sintetska i prirodna vlakna [2]. Prikaz podjele vlakana dan je na Slici 1.

Prirodna vlakna dobivaju se iz prirode, od raznih biljaka, životinja ili kultiviranjem. Neki od najčešćih primjera ove vrste vlakana su lanena, bambusova i konopljina vlakna [3]. Sintetska se vlakna, s druge strane, dobivaju raznim proizvodnim postupcima razvijenim od strane čovjeka. Obje vrste navedenih vlakana imaju svoje prednosti i mane, pa su tako prirodna ekološki prihvatljivija, obnovljiva, jeftina i lako dostupna, no imaju niža mehanička svojstva u odnosu na sintetska [4].

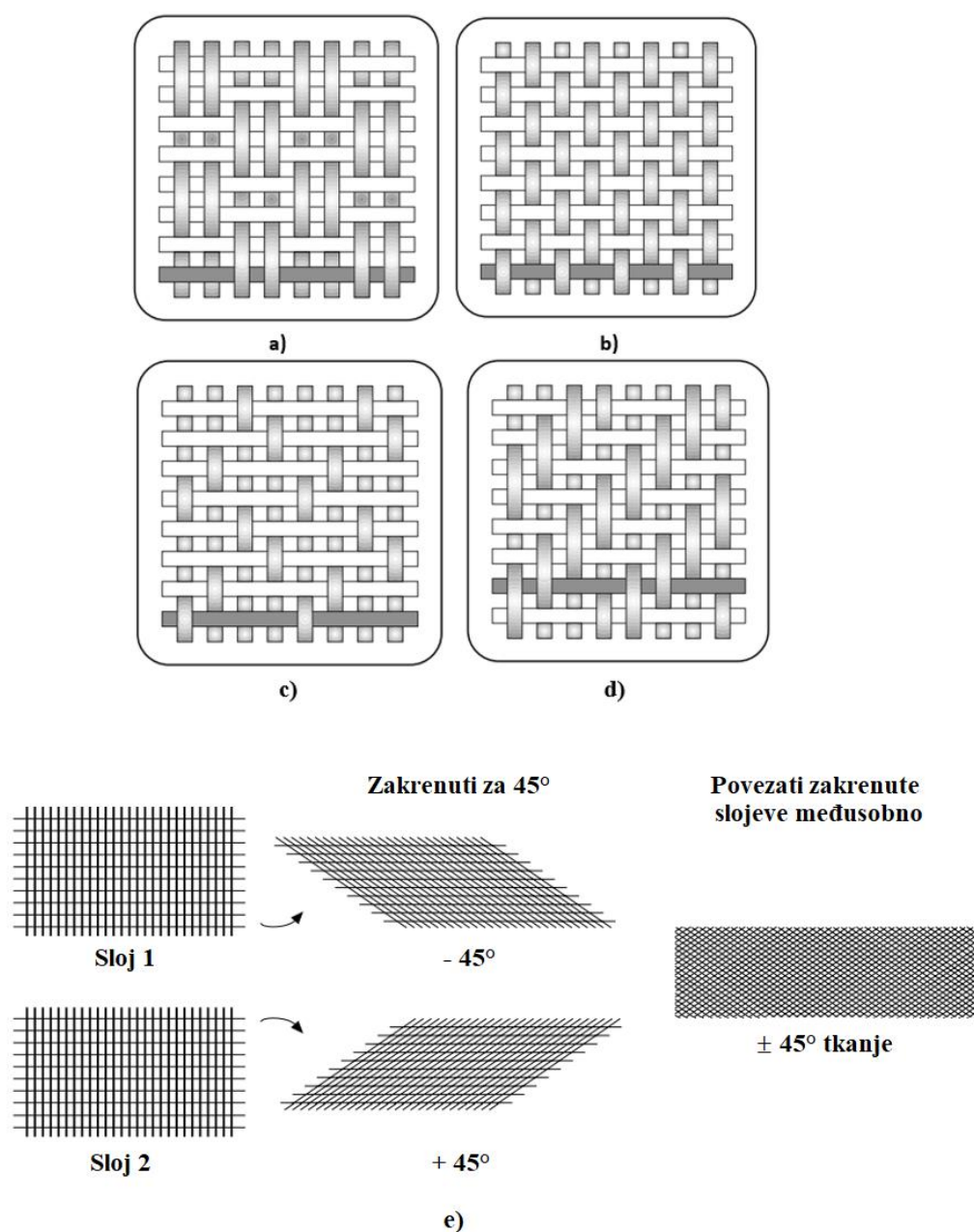
Izbor prirodnih ili sintetskih vlakana ne ovisi samo o njihovim mehaničkim svojstvima i utjecaju na okoliš nego i o prionjivosti vlakna i polimerne matrice. Prirodna su vlakna hidrofилna, odnosno imaju afinitet prema vodi zbog prisustva celuloze. Hidrofilnost uzrokuje lošu adheziju između polimerne matrice i prirodnog ojačala. Sintetski polimeri su hidrofobni pa imaju puno bolju adheziju s polimerima [3]. Osim odabira tipa vlakana i matrice, na varijacije svojstava kompozita utječu i čimbenici poput veličine vlakna, udjela vlakana (volumnog ili masenog), orijentacije i načina tkanja vlakana te proizvodni postupci. Različita

se svojstva još mogu postići raznim kemijskim modifikacijama [3]. Neki od načina tkanja vlakana prikazani su na Slici 2.

Kako su prirodni kompoziti te hibridni kompoziti ojačani prirodnim i sintetskim vlaknima još relativno novi te se o njihovom ponašanju i svojstvima ne zna dovoljno, potrebno je produbiti istraživanja. Stoga je u ovom radu provedena analiza eksperimentalnih podataka na temelju kojih su provedene numeričke simulacije s ciljem razvoja numeričke metodologije za proračun hibridnih kompozitnih konstrukcija u ovisnosti o rasporedu slojeva.



Slika 1. Podjela vlakana za ojačanje kompozita [5]



Slika 2. Različiti načini tkanja vlakana: a) tkanje košarice (e. *basket*); b) obično platneno tkanje (e. *plain*); c) keper (e. *satin*); d) atlas (e. *twill*); e) prošiveno tkanje pod kutom $\pm 45^\circ$ (e. *weave & stitch*) [6]

1.1. Kompoziti ojačani sintetskim vlaknima

Sintetska vlakna izdržljivija su od većine prirodnih vlakana, pružaju višu rasteznu čvrstoću te lakše poprimaju različite oblike kalupa. Osim toga, mnoga sintetska vlakna mogu se modificirati tako da nude posebne funkcije prilagođene potrošačima, poput rastezljivosti, vodonepropusnosti i otpornosti na mrlje. Sintetska vlakna uglavnom nastaju ekstrudiranjem

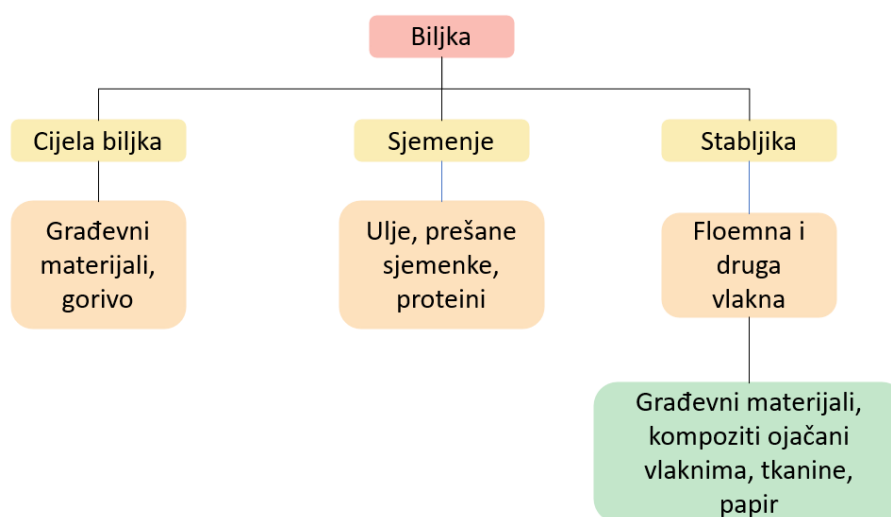
materijala vlakana kroz sapnice u zrak i vodu, tvoreći niti vlakana [7]. U Tablici 1. prikazana je usporedba mehaničkih svojstava za neke tipove vlakana. Duga sintetska vlakna općenito su kruća i čvršća od istog materijala u polaznoj sirovini. Pa tako, obična staklena ploča lomi se pri naprežanju od 20 MPa, dok staklena vlakna imaju čvrstoću do 4800 MPa u komercijalno dostupnim izvedbama. Ova razlika posljedica je manjeg broja defekata u vlaknu nego u sirovom materijalu [8].

Tablica 1. Svojstva različitih tipova sintetskih vlakana [8]

Vlakno	ρ (g cm ⁻³)	E (GPa)	ν	R_m (GPa)	ε_k (%)
SiC	3	400	0,2	2,4	0,6
Borovo	2,6	400	0,2	4	1
Ugljično vlakno visoke krutosti	1,95	380	0,2	2,4	0,6
Ugljično vlakno visoke čvrstoće	1,75	230	0,2	3,4	1,1
E staklo	2,56	76	0,22	2	2,6
Aramidna vlakna (Kevlar 49)	1,45	130	0,35	3	2,3

1.2. Kompoziti ojačani prirodnim vlaknima

Kompoziti ojačani prirodnim vlaknima postaju sve interesantniji za razne primjene zbog svojstava poput niske gustoće, niske cijene, velike dostupnosti sirovina, ali i izvrsne recikličnosti [9]. U Tablici 2. prikazana su mehanička svojstva nekih prirodnih vlakana. Valja spomenuti da maseni udio vlakana u ukupnoj masi biljaka varira ovisno o tipu prirodnog vlakna, pa tako za pamuk on iznosi 5 do 10 %, za lan oko 2,2 do 5 %, a za vlakna konoplje 12 % od sirove stabljike. Ovi podaci govore o mogućnosti iskorištenja ostatka biljke, čime se smanjuje količina poljoprivrednog otpada [10]. Na Slici 3. dan je prikaz primjene pojedinog dijela biljke u slučaju dobivanja vlakana iz floema.



Slika 3. Analiza upotrebe pojedinih dijelova biljke [10]

Tablica 2. Svojstva različitih tipova prirodnih vlakana [9]

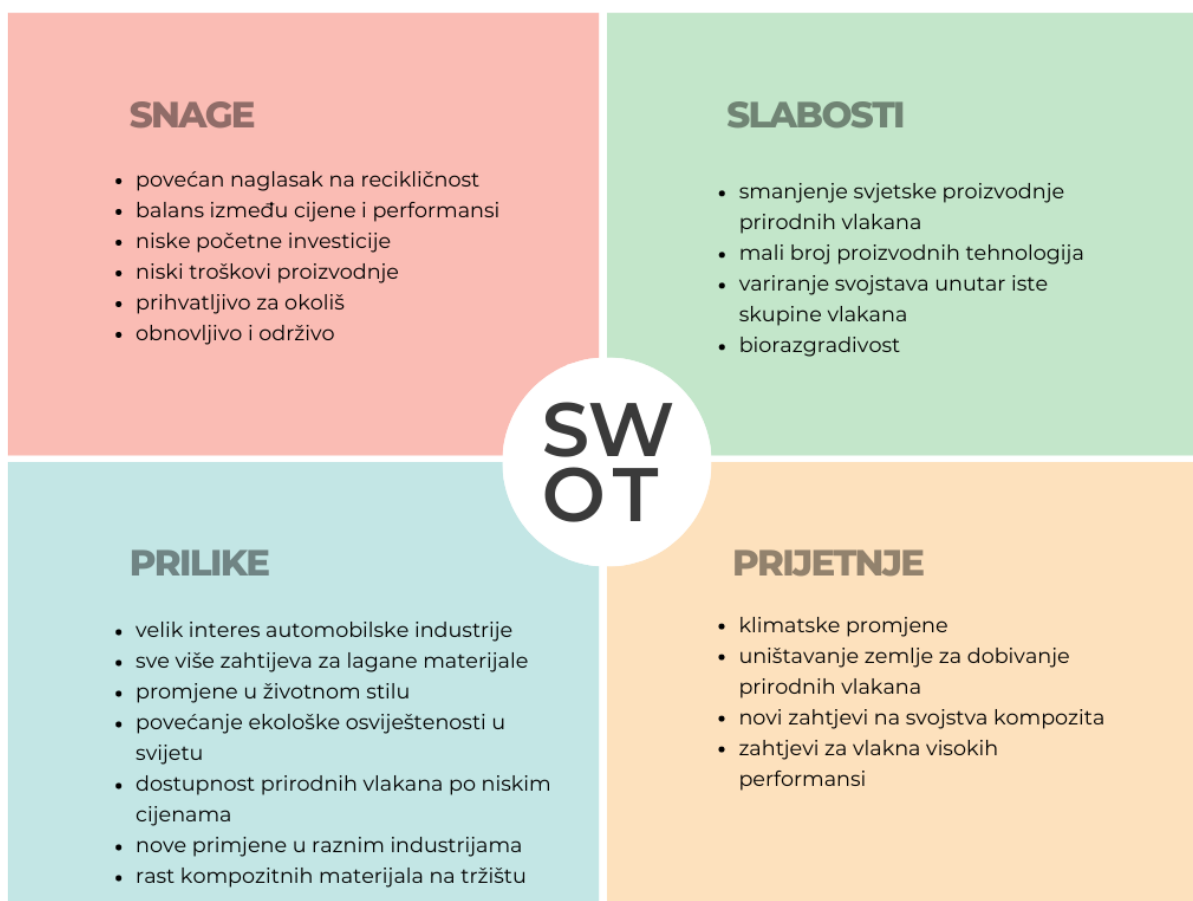
Vlakno	ρ (g cm ⁻³)	E (GPa)	σ_m (MPa)	ε_k (%)
Juta	1,3-1,5	10-55	393-800	1,5-1,8
Banana	1,35	30	750	2,5
Bambus	1,2-1,5	27-40	500-575	1,9-3,2
Sisal	1,3-1,5	9,4-28	507-855	2-2,5
Lan	1,5	27-80	345-1830	1,2-3,2
Ramija	1,5	44-128	400-938	2-3,8
Konoplja	1,5	58-70	550-1110	1,6
Vuna	1,3	2,3-5	50-315	13,2-35
Svila	1,3	5-25	100-1500	15-60
Pamuk	1,5-1,6	2,3-5	50-315	13,2-35

Sa stajališta utjecaja na okoliš, prirodna su vlakna superiorna u odnosu na sintetska u većini slučajeva, a to duguju sljedećim razlozima [11]:

- prerada prirodnih vlakana ima manji utjecaj na okoliš,
- na kraju životnog vijeka, izgaranjem malo zagađuju okoliš,
- energija koja se troši pri proizvodnji prirodnih vlakana dosta je manja nego pri proizvodnji staklenih vlakana (za proizvodnju lanenih vlakana potrebno je oko 17 % energije potrebne za proizvodnju iste količine staklenih vlakana).

Jedan od glavnih nedostataka korištenja prirodnih vlakana u kompozitima je njihova hidrofilna priroda, što ih čini nekompatibilnima s hidrofobnim polimernim matricama [9]. Kontaktna površina između vlakana i matrice igra ključnu ulogu u određivanju mehaničkih svojstava kompozita. Kako se naprezanje prenosi s matrice na vlakna upravo preko kontaktne površine, dobra adhezija je ključna kako bi se postiglo optimalno ojačanje. S druge strane, prevelika povezanost može dovesti do propagacije pukotina, što uzrokuje smanjenje žilavosti i čvrstoće. Da bi nastala veza između matrice i ojačala, oni moraju biti u bliskom kontaktu. Sposobnost vlakana da upija kapljevину može biti ključna kod ostvarivanja veze. Ako vlakna nemaju dovoljno upijanje, dolazi do defekata na kontaktnoj površini koji predstavljaju potencijalne koncentratore naprezanja. Sposobnost vlakana da upija kapljevину utječe na svojstva poput žilavosti te rastezne i savojne čvrstoće kompozita [12]. Nadalje, na površini prirodnih vlakana se nalaze voskovi i druge tvari poput hemi-celuloze, lignina i pektina koji stvaraju slabu adheziju između vlakna i matrice [13]. Kako bi se ove slabosti prirodnih vlakana poboljšale, provode se razne površinske obrade koje uključuju fizikalne i kemijske procese. Fizikalnom obradom površine poboljšavaju se modul, čvrstoća i produljenje vlakana, dok se kemijskom obradom poboljšavaju trajnost i značajke na kontaktnoj površini matrice i vlakana [14]. Osim povećanja hidrofobnosti vlakana i adhezije između polimerne matrice i vlakna, površinskim se obradama poboljšava i hrapavost, sposobnost vlakana da upijaju kapljevину te se smanjuje apsorpcija vlage [13].

Na Slici 4. prikazana je SWOT (e. *Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats*) analiza radi boljeg razumijevanja snaga i slabosti te prednosti i nedostataka korištenja prirodnih vlakana kao ojačala u kompozitnim materijalima. Konstruktori moraju razumjeti slabe strane prirodnih vlakana u kompozitima kako bi mogli odabrati odgovarajuća područja primjene te odrediti moguća poboljšanja [10].



Slika 4. SWOT analiza kompozita ojačanih prirodnim vlaknima [10]

1.3. Hibridni kompoziti

Kao što je već spomenuto, integracijom više različitih tipova vlakana u zajedničku matricu dobivaju se hibridni kompoziti sa širokim rasponom svojstava, koja se ne mogu postići sa samo jednom vrstom ojačala. U slučaju hibridnog kompozita s dva različita tipa vlakana, jedan tip se može nazvati LE (*e. low elongation*), odnosno vlakno s malim produljenjem, dok se drugi naziva HE (*e. high elongation*), odnosno vlakno s velikim produljenjem. Vlakno koje će prvo popustiti je obično vlakno s malim produljenjem. HE vlakno nema nužno jako veliko produljenje, ali je ono veće od produljenja LE vlakna pa je stoga važno koristiti termine LE/HE, a ne krhko i duktilno vlakno [9]. Povoljna svojstva jednog tipa vlakana mogu nadomjestiti nedostatak tih svojstava u drugim konstituentima hibridnog kompozita. Prikladnim izborom materijala, kao rezultat, dobije se balans između cijene i performansi [15]. Kombinacijom prirodnih i sintetskih vlakana postiže se smanjenje higroskopsnosti kompozita, balansiranje troškova, niža potrošnja energije, ali i manja štetnost za okoliš te poboljšanje performansi

gotovog kompozita. Prirodna su vlakna hidrofilna zbog prisustva OH skupina na njihovoj površini te dolazi do bubrenja koje rezultira pogoršanjem svojstava. Razne površinske obrade mogu poboljšati svojstva, ali se koriste jake kemikalije koje nisu pogodne za okoliš. Stoga, hibridni kompoziti u kojima se koriste kombinacije hidrofobnih sintetskih i hidrofilnih prirodnih vlakana pružaju adekvatnu zamjenu [16]. No ipak, kombinacija sintetskih i kemijski tretiranih prirodnih vlakana nudi rješenje za većinu primjena i ograničenja. Većina istraživanja hibridnih kompozita usmjerena je prema smanjenju udjela sintetskih vlakana [17].

Na svojstva hibridnih kompozita utječu sljedeći čimbenici [7]:

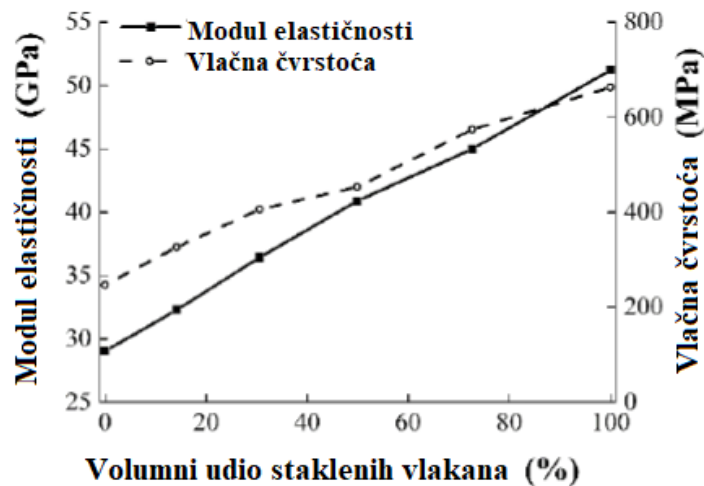
- orijentacija vlakana
- duljina i udio vlakana
- redoslijed slaganja različitih vlakana
- kompatibilnost različitih vlakana
- kontaktna površina te
- prekidno istezanje pojedinog vlakna.

Hibridni kompoziti posjeduju svojstva od velike važnosti za zrakoplovnu industriju, poput otpornosti na umor i koroziju te izvrsne otpornosti na udare. No, najznačajniji doprinos je smanjenje mase gdje se mogu postići uštede od 20 do 50 % [7].

Što se triboloških svojstava tiče, kompoziti ojačani sintetskim vlaknima pokazuju višu udarnu žilavost i više čvrstoće koje su posljedica jako dobre adhezije između vlakana i matrice. Prirodna vlakna imaju oko 70 % nižu tvrdoću od ugljičnih vlakana, što je posljedica slabe adhezije. S druge strane, kenaf pokazuje 10 do 25 % nižu stopu trošenja, pri opterećenju od 25,5 N, u odnosu na kompozite ojačane staklom. Niska stopa trošenja prirodnih vlakana čini ih prigodnim za abrazivne okoline te je uočeno izuzetno visoko savojno istezanje prirodnih vlakana. Prirodna vlakna stoga bolje podnose iznenadna transverzalna opterećenja [18]. Delaminacija tekstilnih kompozita češća je pojava kod hibridnih kompozita [10]. Raspored slojeva igra važnu ulogu u postizanju određenih mehaničkih svojstava kod hibridnih kompozita. Laminati sa slojevima sintetskih vlakana na vanjskim dijelovima daju optimalna svojstva i cijenu [3].

Santulli i sur. [19] proučavali su kako djelomična zamjena E staklenih vlakana s lanenima utječe na udarna svojstva kompozita s epoksidnom matricom. Kompoziti ojačani samo lanom ili lanom i staklom postigli su zadovoljavajuću otpornost na udar uz značajno smanjenje mase u usporedbi s kompozitima ojačanim samo staklenim vlaknima. Na Slici 5. su prikazana svojstva

spomenutih hibrida. Vidljivo je da i modul elastičnosti i rastezna čvrstoća rastu s porastom udjela staklenih vlakna. Pokazalo se i da redoslijed slaganja utječe na svojstva poput rastezne čvrstoće i prekidnog istezanja, ali ne i na modul elastičnosti. Lomna žilavost i međuslojna smična čvrstoća hibridnih kompozita veće su nego kod kompozita ojačanih samo staklenim vlaknima [9].



Slika 5. Rastezna (vlačna) čvrstoća i modul elastičnosti kompozita s fenolnom matricom ojačani lanenim i staklenim vlaknima [9]

1.4. Pregled literature

Kao što je već spomenuto, prirodna vlakna postaju sve popularnija za upotrebu u kompozitnim materijalima. S obzirom na to da ovi kompoziti nemaju dovoljno dobra svojstva za sve primjene, veliki se interes pridaje izradi hibridnih kompozita s kombinacijom prirodnih i sintetskih vlakana. Uvođenjem staklenih vlakana u prirodne kompozite poboljšavaju se mehanička svojstva poput rastezne [20–26] i savojne [21,24,25] čvrstoće.

Zhang i sur. [22] proučavali su ponašanje mehaničkih svojstava jednosmjerno usmjerenih lanenih i staklenih vlakana u fenolnoj matrici. Uočeno je da i rastezni modul i čvrstoća rastu s udjelom staklenih vlakana. Redoslijed slaganja slojeva vlakana utječe na rasteznu čvrstoću i prekidno istezanje, ali ne i na modul elastičnosti. Također, Reddy i sur. [27] su u svom istraživanju uočili da dodavanje slojeva staklenih vlakana u kompozit ojačan vlaknima banane dovodi do porasta rastezne i savojne čvrstoće te udarne žilavosti.

Blanchard i Sobey [28] su u svom istraživanju napravili detaljan pregled literature o mehaničkim svojstvima kompozita ojačanih lanenim vlaknima kako bi se odredio njihov raspon

i varijacije te su se ta svojstva usporedila sa svojstvima kompozita ojačanih staklenim vlaknima. Zaključeno je kako konstrukcije od lanenih kompozita moraju biti 2,4 puta teže od onih izrađenih od kompozita ojačanih staklenim vlaknima kako bi imale ekvivalentnu sigurnost. Dakle, iako se lanena vlakna mogu koristiti u raznim primjenama, ne mogu zamijeniti staklena vlakna kod konstrukcija ograničenih volumena.

Zhu i sur. [29] pratili su utjecaj naprednih obrada lanenih vlakana na mehanička svojstva, ali i kompatibilnost između vlakana i različitih tipova polimernih matrica. Također, uočeno je kako postupak izrade kompozita i konfiguracija vlakana kod kompozita s epoksidnom matricom ojačanom lanenim vlaknima imaju veliki utjecaj na svojstva.

Khalid i sur. [30] su istraživali rastezna svojstva hibridnih kompozita ojačanih prirodnim i sintetskim vlaknima. Hibridi staklenih i jutenih vlakana pripremljeni su postupkom ručnog polaganja uz različite rasporede slaganja vlakana. Rezultati eksperimenata pokazuju da se svojstva kompozita ojačanih staklenim vlaknima (GFRP) tek neznatno promjene dodatkom male količine jutenih vlakana. Čvrstoća ploča s jednim slojem jutenih vlakana i četiri sloja staklenih pokazala se usporedivom s čvrstoćom GFRP ploča. Za validaciju eksperimentalnih rezultata rasteznog ispitivanja provedene su i numeričke simulacije na 3D ispitnim tijelima za rastezno ispitivanje. Materijali su definirani kao ortotropni, a pomak je zadan preko pomične čeljusti dok su na nepomičnu čeljust postavljeni rubni uvjeti uklještenja. Razlike u rezultatima uočene su za različite rasporede slaganja slojeva vlakana uslijed nejednolikog promjera jutenih vlakana i postupka ručnog polaganja za izradu kompozitnih ploča.

Mostafa [31] je u svojoj studiji također proveo eksperimentalna ispitivanja rasteznih svojstava hibrida ojačanih tkanjima staklenih i jutenih vlakana. Rezultati su pokazali da djelomična zamjena staklenih vlakana jutenima čini kompozite ekološki prihvatljivijima iako dolazi do snižavanja rasteznih svojstava.

Sabäu i sur. [32] su u svom radu proveli savojno ispitivanje u tri točke na kompozitima ojačanima tkanjem i jednosmjerno usmjerenim staklenim vlaknima. Provedena je i simulacija metodom konačnih elemenata kako bi se istražila mehanička svojstva spomenutih kompozita. Rezultati simulacije uspoređeni su s rezultatima eksperimentalnih ispitivanja te su pokazali slične vrijednosti.

Iako je sve veći broj radova usmjeren prema prirodnim i hibridnim kompozitima, još uvijek ima prostora za nova istraživanja različitih kombinacija prirodnih i sintetskih vlakana u različitim matricama. Također, potrebno je dodatno istražiti različite rasporede slaganja slojeva te njihov utjecaj na mehanička svojstva hibridnih kompozita kako bi se pronašao optimum

između niske gustoće i zadovoljavajućih svojstava. Poželjno je provesti numeričke simulacije kako bi se rješenja usporedila s eksperimentalnim i time smanjila potreba za dodatnim eksperimentima.

2. CILJEVI RADA

Opći cilj ovog rada je pripremiti kompozite od epoksidne smole ojačane lanenim i staklenim vlaknima s različitim redoslijedom slaganja vlakana, ispitati utjecaj redoslijeda slaganja na mehanička svojstva te odrediti svojstva materijala koja su neophodna za pouzdanu numeričku simulaciju čvrstoće razmatranih kompozita. Potrebno je ispitati njihova mehanička svojstva pri savojnom i rasteznom opterećenju, a dobivene rezultate iskoristiti za validaciju numeričkog modela.

Pet kompozitnih ploča se ojačava sa šest slojeva tkanja. Tri kompozita su hibridna, a svaki je ojačan s dva sloja staklenih i četiri sloja lanenih vlakana. Dva sloja staklenih vlakana raspoređena su simetrično u odnosu na srednju ravninu ploče. Slaganje tkanina kod hibrida provodi se tako da se jedan laminira sa staklenim vlaknima u vanjskim slojevima 1 i 6, drugi u slojevima 2 i 5 i treći sa staklenim vlaknima u sredini kompozita, odnosno u slojevima 3 i 4. Ostali slojevi u hibridima su laneni. Preostale dvije ploče se sastoje od samo jedne vrste tkanina slaganih u šest slojeva, odnosno samo staklena ili samo lanena vlakna. Dobiveni kompoziti imaju sljedeći raspored slojeva vlakana: SLLLLL, LSLLSL, LLSSLL, SSSSSS i LLLLLL, pri čemu je S oznaka za staklo, a L za lan. Staklena vlakna imaju bolja mehanička svojstva od lanenih i bolje se vežu s polimernom matricom. Vlakna biljnog podrijetla se zbog svoje hidrofilne prirode slabije vežu s hidrofobnim polimerima, stoga je prijenos opterećenja s matrice na ojačalo manji, nego kod kompozita sa staklenim vlaknima. Pri savijanju su najviša naprezanja u vanjskim slojevima, a najniža u blizini neutralne ravnine.

Korištenjem eksperimentalno određenih mehaničkih svojstava kompozita sa staklenim i kompozita s lanenim vlaknima iz rasteznog ispitivanja, potrebno je izraditi numeričke modele ispitnih tijela sa složenijim (hibridnim) rasporedima slojeva. Validacija numeričke metodologije provodi se usporedbom s rezultatima savojnog ispitivanja.

Prva hipoteza je da će hibrid sa staklenim vlaknima u vanjskim slojevima imati najbolja mehanička svojstva među svim hibridima, dok će onaj sa staklenim vlaknima u sredini imati značajno niža svojstva. Za potrebe modeliranja, sve kompozite je potrebno ispitati i pri jednoosnom rasteznom opterećenju. Rezultate ispitivanja potrebno je primijeniti za izradu modela uz pomoć programa za numeričku simulaciju metodom konačnih elemenata Abaqus/Standard koristeći prikladne vrste konačnih elemenata, načine diskretizacije kompozitnih ploča i materijalnih modela.

Prvi specifični cilj rada je pripravljanje kompozitnih ploča od epoksidne smole ojačane staklenim (S) i lanenim (L) vlaknima postupkom ručnog laminiranja. Nakon toga potrebno je

odrediti dimenzije ispitnih tijela za ispitivanje rasteznih i savojnih svojstava prema HRN EN ISO 527-4 i HRN EN ISO 14 125 i pripremiti ispitna tijela te ispitati mehanička svojstva na univerzalnoj kidalici u skladu s navedenim normama. Zatim je potrebno vrednovati rezultate mjerenja i utvrditi utjecaj tipa i rasporeda vlakana na mehanička svojstva te nakon toga izraditi numeričke modele te odrediti potrebna mehanička svojstva za proračun čvrstoće hibridnih kompozitnih ploča.

3. MATERIJALI I METODE

Izrada ispitnih tijela i ispitivanja mehaničkih svojstava provedeni su u Laboratoriju za polimere i kompozite Zavoda za materijale, dok je numerički dio eksperimenta proveden na Katedri za zrakoplovne konstrukcije Zavoda za zrakoplovno inženjerstvo, na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Cjelokupni eksperiment sastoji se od sljedećih koraka:

1. izrada kompozitnih ploča postupkom ručnog polaganja
2. izrezivanje ispitnih tijela za rastezno i savojno ispitivanje
3. mjerenje dimenzija ispitnih tijela i unošenje u softver kidalice
4. provedba rasteznog ispitivanja na kidalici
5. provedba savojnog ispitivanja u tri točke na kidalici
6. izdvajanje dijagrama dobivenih ispitivanjima
7. izrada modela za numeričku simulaciju
8. provedba simulacija.

3.1. Izrada kompozitnih ploča

Kompozitne ploče mogu se izraditi raznim postupcima, ovisno o vrsti matrice. U ovom radu izrađene su postupkom ručnog polaganja u kalup, koji je ujedno jedan od najčešćih postupaka pripreme kompozita. Na Slici 6. prikazan je shematski prikaz postupka ručnog polaganja. Prednosti ovog postupka su niska cijena, jednostavnost te mogućnost kombinacije raznih materijala vlakana i matrice [8]. Glavna ograničenja ručnog polaganja odnose se na ovisnost kvalitete proizvoda o vještinama tehničara, povećano isparavanje smole u odnosu na druge postupke i neurednost postupka [33].

Kalupi za pripravu ravnih kompozitnih ploča su izrađeni od čelika, a na dno je postavljena staklena ploča. Staklo je premazano odvajalom, kako bi se ploče lakše izvadile iz kalupa. Epoksidna smola tipa Novapox veza, proizvođača Nova-chem d.o.o. iz Karlovca, dvokomponentna je smjesa koja se miješa neposredno prije izrade u omjeru propisanom od proizvođača. Materijali ojačala korišteni u ovom radu su lan i staklo. Izrađeno je pet ploča sa sljedećim rasporedima slojeva: SLLLLS, LSLLSL, LLSSLL, SSSSSS i LLLLLL. Staklena tkanja proizvedena su u Keltexu, Karlovac, a orijentirana su pod kutovima 0° i 90° , Slika 7., dok su lanena vlakna proizvođača Bcomp iz Švicarske, tipa ampliTexTM 350, biaksijalno $\pm 45^\circ$ orijentirana, Slika 8. Vlakana su postavljena na dno kalupa te je na njih nanesen sloj smole

pomoću kista. Ovaj se korak ponavlja za šest slojeva vlakana. Postupak ručnog polaganja prikazan je na Slici 9. Na kalup je položen poklopac koji je potom opterećen utezima kako bi se postigla bolja impregnacija vlakana i smanjio udio šupljina. Polimerizacija, odnosno umrežavanje matrice, odvija se u kalupu pri sobnoj temperaturi u trajanju od 48 sati. Kalup se otvara i ploče se odvajaju od njihove površine.



Slika 6. Shematski prikaz postupka ručnog polaganja [34]



Slika 7. Tkanje staklenih vlakana (e. woven)

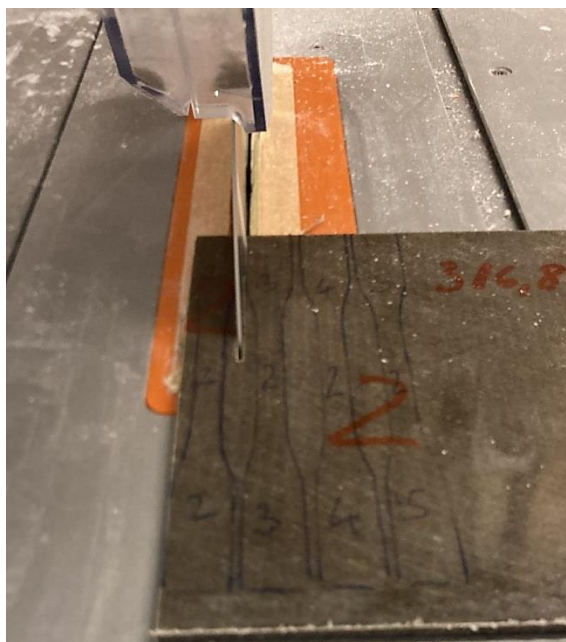


Slika 8. Tkanina lanenih vlakana pod kutom $\pm 45^\circ$



Slika 9. Ručno polaganje: a) nanošenje smole, b) ploča spremna za polimerizaciju

Nakon polimerizacije i otvaranja kalupa, iz kompozitnih ploča kružnom pilom izrezani su uzorci za rastežno i savojno ispitivanje, kao što je prikazano na Slici 10., u skladu s normama EN ISO 527-4:2012 i EN ISO 14125:1998.



Slika 10. Izrezivanje ispitnih tijela za rastezno ispitivanje kružnom pilom

Nakon izrezivanja izmjerene su dimenzije poprečnog presjeka svih ispitnih tijela, a vrijednosti srednjih dimenzija dane su u Tablici 3. za rastezno ispitivanje i u Tablici 4. za savojno ispitivanje. Ispitna tijela za rastezno ispitivanje imaju oblik vesla, sa suženim dijelom u sredini širine približno 10 mm, kako ne bi pucala u čeljustima. Ispitna tijela za savojno ispitivanje određena normom HRN EN ISO 14125:1998, pri čemu je širina za kompozite do 10 mm debljine ojačane tkanjima približno 15 mm, a duljina se računa iz srednje vrijednosti debljine ploče i iznosi približno $20h_{sr}$. Prvim brojem označen je broj ploče, a drugim broj ispitnog tijela. U Tablici 5. naveden je raspored vlakana za svaku ploču.

Tablica 3. Dimenzije ispitnih tijela za rastezno ispitivanje

	h , mm	h_{sr} , mm	b , mm	b_{sr} , mm
1_1	4,96	4,9	10,08	10,29
1_2	4,98		10,52	
1_3	4,88		10,30	
1_4	4,90		10,60	
1_5	4,76		9,94	
2_1	5,10	5,23	10,42	10,33
2_2	5,06		10,66	

2_3	5,90		10,38	
2_4	5,00		9,76	
2_5	5,08		10,44	
3_1	4,78	4,75	9,96	10,48
3_2	4,78		10,74	
3_3	4,78		10,78	
3_4	4,72		10,86	
3_5	4,70		10,08	
4_1	0,64	0,75	9,82	9,92
4_2	0,72		10,36	
4_3	0,72		10,14	
4_4	0,82		9	
4_5	0,85		10,3	
5_1	6,6	6,56	10,3	10,06
5_2	6,6		10,48	
5_3	6,48		9,16	
5_4	6,48		10,28	
5_5	6,64		10,08	

Tablica 4. Dimenzije ispitnih tijela za savojno ispitivanje

	h , mm	h_{sr} , mm	b , mm	b_{sr} , mm
1_1	4,70	4,67	14,78	14,86
1_2	4,82		14,80	
1_3	4,56		15,04	
1_4	4,60		14,94	
1_5	4,68		14,76	
2_1	4,90	4,83	14,94	14,9
2_2	4,90		14,70	
2_3	4,84		14,92	
2_4	4,80		14,98	
2_5	4,70		14,96	
3_1	4,76	4,75	15,02	14,95
3_2	4,74		14,94	
3_3	4,74		14,96	

3_4	4,74		15,00	
3_5	4,78		14,84	
4_1	6,64	6,58	14,64	14,87
4_2	6,58		15,08	
4_3	6,56		14,96	
4_4	6,52		14,78	
4_5	6,60		14,88	
5_1	0,96	0,936	15,64	15,14
5_2	0,90		14,70	
5_3	0,86		15,22	
5_4	0,96		15,06	
5_5	1,00		15,08	

Izračunat je i maseni udio pojedinih vlakana u hibridnim kompozitima (Tablica 5.) prema sljedećem izrazu:

$$w(\text{vlakana}) = \frac{m_{vl}}{m_p} * 100 \%. \quad (1.1)$$

Tablica 5. Maseni udjeli pojedinih vlakana

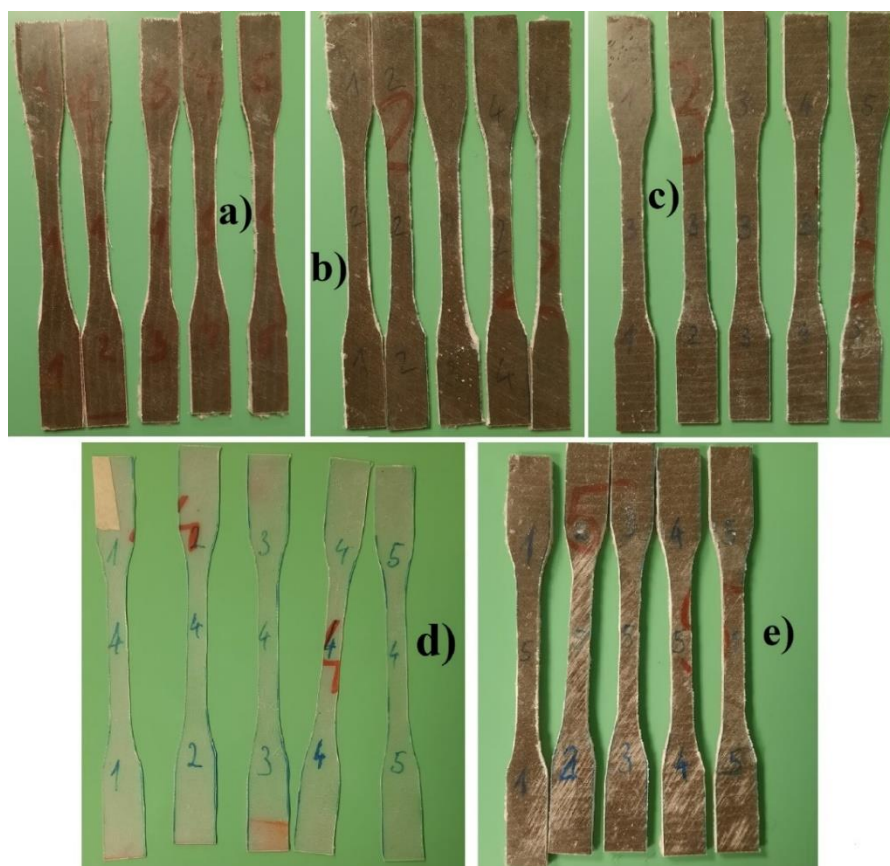
Ploča	Raspored slojeva	$w(\text{lan})$, %	$w(\text{staklo})$, %
1	SLLLLS	19,41	9,71
2	LSLLSL	18,9	9,45
3	LLSSLL	19,17	9,59
4	SSSSSS	/	35,15
5	LLLLLL	28,46	/

3.2. Rastezno ispitivanje

Rasteznim se ispitivanjem dobivaju podaci o ponašanju materijala pri rasteznom opterećenju i određuju svojstva poput rastezne čvrstoće, modula elastičnosti i drugih svojstava koja se mogu dobiti iz odnosa rasteznog napreznja i deformacije. Ispitno tijelo se rasteže uzduž longitudinalne osi konstantnom brzinom dok ne dođe do popuštanja ili dok napreznje ili

deformacija ne dosegnu neke ranije zadane vrijednosti. Tijekom ispitivanja mjere se sile i produljenja ispitnih tijela [35].

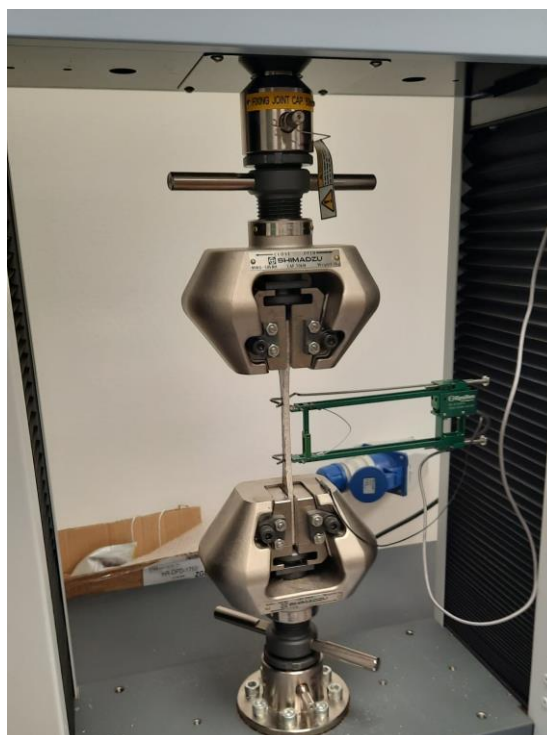
Nakon izrade ispitnih tijela provedeno je rastezno ispitivanje u Laboratoriju za polimere i kompozite na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, s ciljem dobivanja modula elastičnosti i rastezne čvrstoće kompozitnih ploča, koji su dalje korišteni pri izradi numeričkih simulacija. Ukupno je pripremljeno 25 ispitnih tijela, prikazanih na Slici 11. Ispitivanje je provedeno prema normi HRN EN ISO 527-4:2012, a za provedbu eksperimenta korištena je kidalica Shimadzu AGS-X s mjernim područjem od 50 kN, prikazana na Slici 12. Brzina ispitivanja za sve uzorke iznosi 2 mm/min. Popratni softver, Trapezium X, omogućuje upravljanje kidalicom te bilježenje rezultata u elektronskom obliku. Po završetku ispitivanja softver prikazuje dijagrame naprezanje-deformacija za svako ispitno tijelo. Rastezno ispitivanje provodi se na način da se ispitna tijela učvrste u čeljusti (Slika 13.), od kojih je jedna fiksna, a druga pomična. Na ispitno tijelo pričvršćen je senzor za praćenje produljenja, ekstenzometar, uz pomoć kojeg se prati produljenje na dijelu ispitnog tijela s konstantnim poprečnim presjekom, pri čemu je početna duljina $l_0 = 50$ mm. Na Slici 14. prikazana su ispitna tijela nakon provedenog ispitivanja.



Slika 11. Ispitna tijela za rastezno ispitivanje: a) ploča SLLLLS ; b) ploča LSLLSL; c) ploča LLSSLL; d) ploča SSSSSS; e) ploča LLLLLL



Slika 12. Kidalica Shimadzu AGS-X



Slika 13. Ispitno tijelo u čeljustima kidalice s postavljenim ekstenzometrom

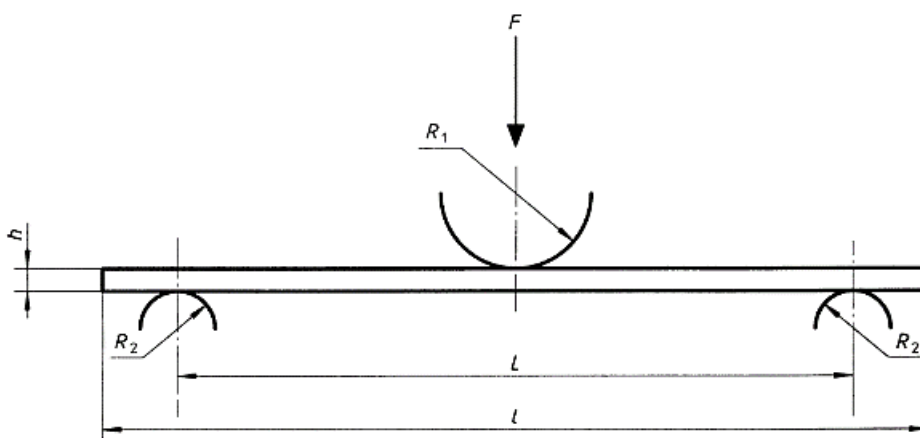


Slika 14. Ispitna tijela nakon provedenog rasteznog ispitivanja

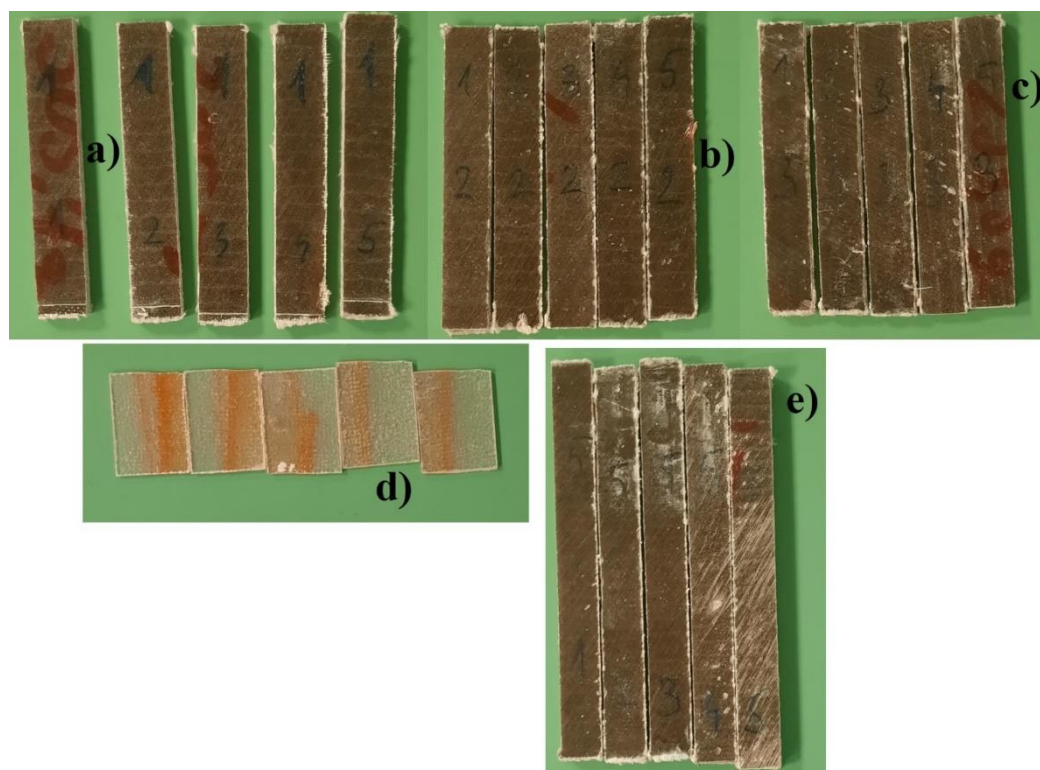
3.3. Savojno ispitivanje

Savojnim ispitivanjem prati se ponašanje materijala pri savijanju, pri čemu su dobivaju vrijednosti savojne čvrstoće, savojnog modula i drugih svojstava iz veze napreznja i deformacija. U slučaju ispitivanja u tri točke, ispitno tijelo postavlja se na oslonce i opterećuje u sredini konstantnom brzinom deformacije dok ne dođe do popuštanja ili dok se ne dosegne neka ranije definirana deformacija. Tijekom ispitivanja, ispitno tijelo se opterećuje silom preko slobodno oslonjenog valjka i mjeri se progib. Promjer valjka za opterećivanje R_1 treba biti 5 mm, kao i promjer oslonaca R_2 , ukoliko je debljina viša od 3 mm [36].

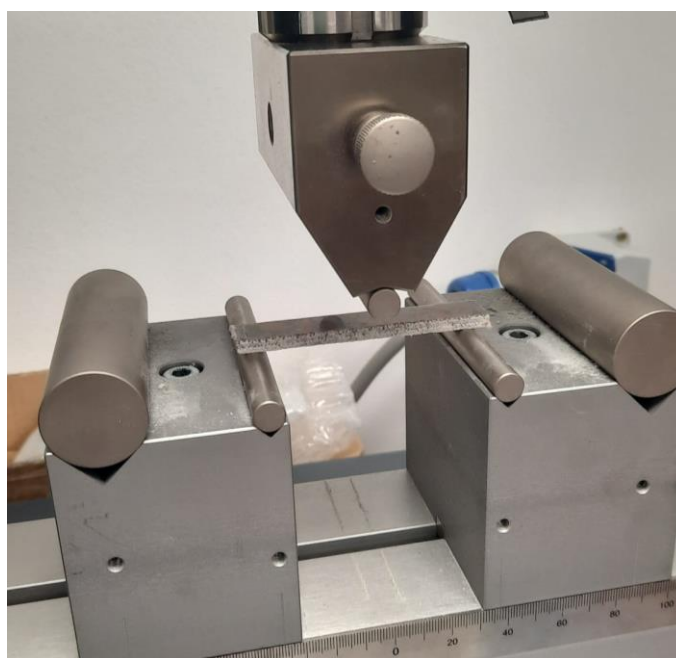
Savojno ispitivanje također je provedeno na Shimadzu AGS-X kitalici, pri istoj brzini ispitivanja od 2 mm/min. Pomoću ovog ispitivanja dobiveni su podaci o savojnom modulu i savojnoj čvrstoći ploča. Korištena je metoda ispitivanja u tri točke (Slika 15.), prema normi EN ISO 14125:1998. Ispitna tijela, prikazana na Slici 16., postavljaju se na dva valjkasta oslonca, dok treći oslonac služi za opterećivanje. Razmak između oslonaca određuje se iz srednje vrijednosti debljine ispitnih tijela (Tablica 4.), i iznosi $16h_{sr}$. Na Slici 17. prikazano je savojno ispitivanje na Shimadzu AGS-X kitalici, dok su na Slici 18. prikazana ispitna tijela nakon provedenog ispitivanja.



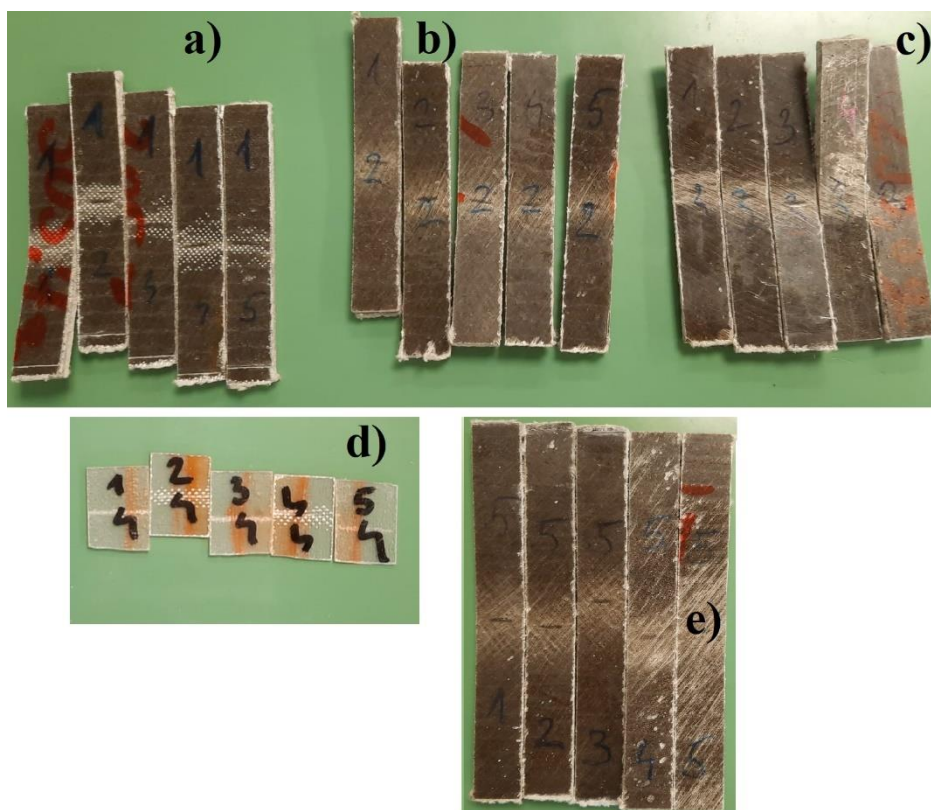
Slika 15. Savojno ispitivanje u tri točke [36]



Slika 16. Ispitna tijela prije ispitivanja: a) ploča SLLLLS, b) ploča LSLLSL, c) ploča LLSSLL, d) ploča SSSSSS, e) ploča LLLLLL



Slika 17. Ispitno tijelo na osloncima u kidalici



Slika 18. Ispitna tijela nakon provedenog savojnog ispitivanja: a) ploča SLLLLS, b) ploča LSLLSL, c) ploča LLSSLL, d) ploča SSSSSS, e) ploča LLLLLL

3.4. Simulacija rasteznog ispitivanja

Za analizu ispitnog tijela za rastezno ispitivanje korišteni su konvencionalni ljuskasti konačni elementi u Abaqus/Standard-u (e. *Conventional Shell*). Dimenzije ispitnih tijela i mreža konačnih elemenata ispitnog tijela za rastezno ispitivanje prikazane su na Slici 18. Pri modeliranju korišteni su S4R elementi prosječne dimenzije 4 mm za širi dio ispitnog tijela (glavu), odnosno 2 mm za uži dio (tijelo), kao što je prikazano na Slici 19. Generirana je mreža od ukupno 350 elemenata i 426 čvorova. Postavljeni su rubni uvjeti uklještenja na donju prihvatnu glavu, dok je na gornjoj, uz ograničavanje pomaka i rotacija u ostalim smjerovima, zadan pomak do kojeg se ispitivanje provodi, kako je prikazano na Slici 20. Epoksidna smola ojačana staklenim vlaknima modelirana je kao linearno elastičan ortotropan materijal u stanju ravninskog napreznja (lamina). Nakon provedbe inicijalnih numeričkih simulacija zaključeno je da se za modeliranje slojeva epoksidne smole ojačane lanenim vlaknima mora uključiti nelinearno ponašanje materijala kako bi se postigao bolji opis eksperimentalno određenog ponašanja ovog materijala. Budući da u Abaqusu nisu dostupni adekvatni materijalni modeli koji bi omogućili modeliranje nelinearnosti kompozitnih materijala, ponašanje slojeva ojačanih

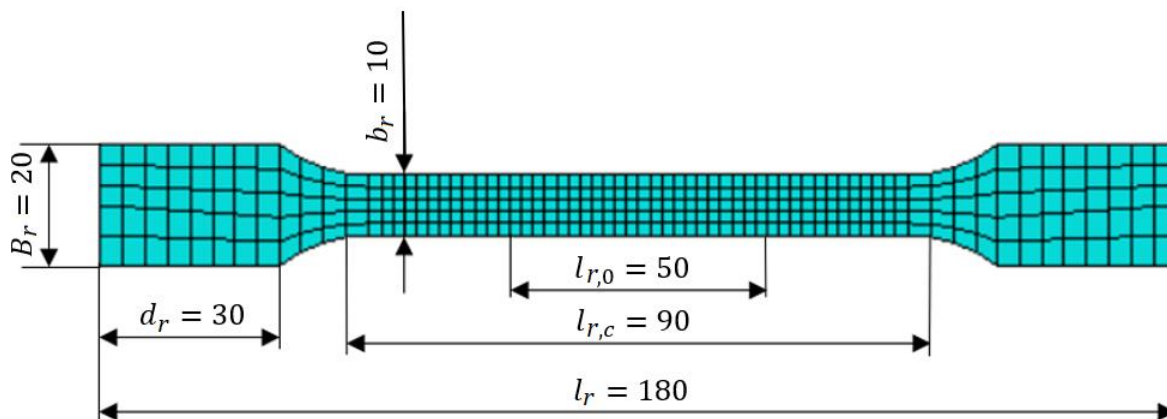
lanenim vlaknima aproksimirano je primjenom izotropno elastičnog materijalnog modela uz model plastičnosti s izotropnim očvršnućem. Za usporedbu utjecaja ove pretpostavke, modelirana je i epoksidna smola ojačana lanenim vlaknima kao ortotropan materijal u stanju ravninskog naprezanja. Raspored slojeva kompozitnih uzoraka modeliran je kao *Composite Layup*. Podaci o modulima elastičnosti materijala uzeti su iz eksperimentalnog ispitivanja, dok su smični moduli i Poissonov faktor za epoksidnu smolu ojačanu staklenim vlaknima preuzeti iz literature [37], a smični moduli za epoksidnu smolu ojačanu lanenim vlaknima iz literature [38] dok je Poissonov faktor preuzet iz literature [39]. Vrijednost G_{23} pretpostavljena kao 80 % od G_{12} na temelju uobičajenog odnosa navedenih modula smičnosti u vlaknima ojačanim kompozitima. U Tablici 6. prikazana su korištena mehanička svojstva za sva tri modelirana materijala. Treći materijal izotropno je elastičan, uz $E = E_1$ koji je naveden u tablici. Dijagrami na temelju kojih su određena mehanička svojstva dani su na Slici 29. za rastezno ispitivanje te Slici 35. za savojno ispitivanje. U Tablici 7. prikazana su zadana svojstva za model plastičnosti s izotropnim očvršnućem.

Tablica 6. Mehanička svojstva modeliranih materijala

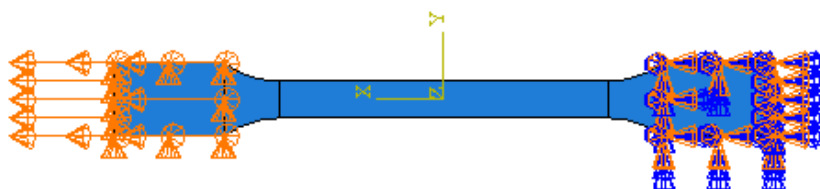
	Epoksidna smola ojačana staklenim vlaknima	Epoksidna smola ojačana lanenim vlaknima	Epoksidna smola ojačana lanenim vlaknima (plastičnost)
E_1 , MPa	12756,89	4695,75	4695,75
E_2 , MPa	12756,89	4695,75	/
ν_{12}	0,15	0,3	0,3
G_{12} , MPa	3100	1500	/
G_{13} , MPa	3100	1500	/
G_{23} , MPa	2480	1200	/

Tablica 7. Svojstva za model plastičnosti s izotropnim očvršnućem

Epoksidna smola ojačana lanenim vlaknima (plastičnost)	
Naprezanje, MPa	Plastična deformacija
48,28	0
59,44	0.0077
61,42	0.014



Slika 19. Mreža elemenata ispitnog tijela za rastezno ispitivanje od epoksidne smole ojačane lanenim vlaknima, dimenzije su u [mm]



Slika 20. Rubni uvjeti i zadani pomak u simulaciji rasteznog ispitivanja

3.5. Simulacija savojnog ispitivanja

Za analizu ispitnog tijela za savojno ispitivanje također su korišteni konvencionalni ljuskasti konačni elementi u Abaqus/Standard-u. Duljina ispitnih tijela ovisi o debljini, a računa se kao:

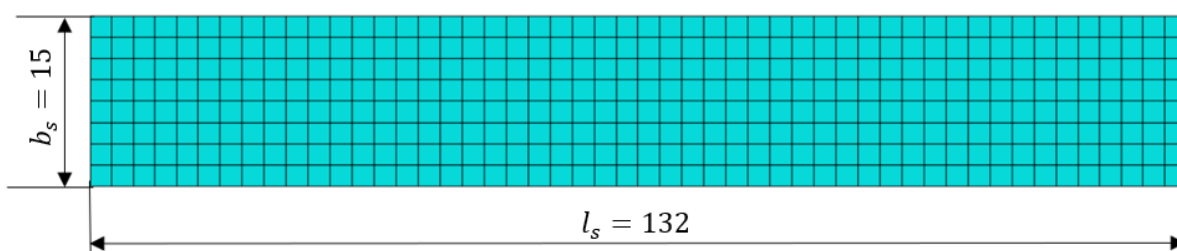
$$l_s = 20 * h_{sr}, \quad (1.2)$$

dok širina iznosi 15 mm. Promjer oslonaca i valjka za opterećivanje iznosi 5 mm. Podaci o numeričkim modelima za pojedine modele dani su u Tablici 8., a na Slikama 21. i 22. prikazani su numerički modeli ispitnog tijela te oslonaca i valjaka za opterećivanje. Numerički modeli ispitnog tijela za pojedinu ploču razlikuju se zbog različitih debljina, kao što je navedeno u Tablici 4. Oslonci i valjak za opterećivanje modelirani su kao kruta tijela (e. *Discrete rigid*). Na valjku za opterećivanje određena je referentna točka preko koje je definiran pomak. Nakon izrade modela ispitivanja, postavljene su geometrijske veze između pozicija, odnosno uspostavljen je kontakt između oslonaca i valjka za opterećivanje te ispitnog tijela pomoću opcije e. *General contact*. Postavljeni su rubni uvjeti (Slika 23.) uklještenja na oslonce, dok su

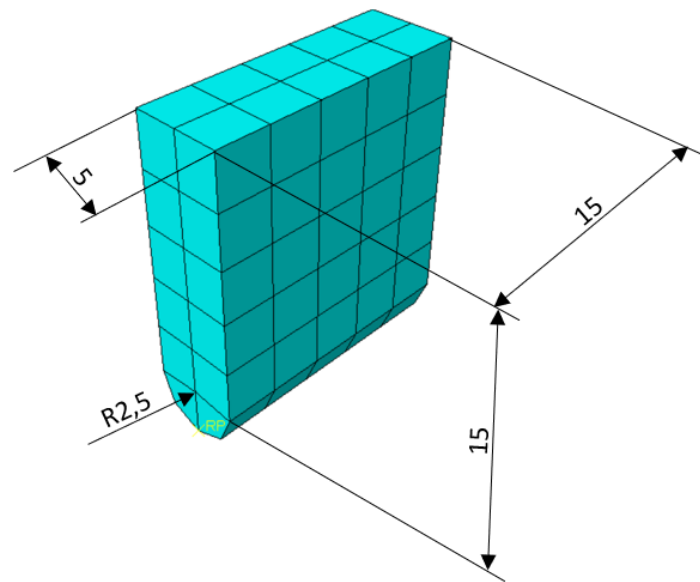
na valjku za opterećivanje spriječeni pomaci i rotacije u svim smjerovima, osim u smjeru osi y , gdje je zadan pomak do kojeg će se simulacija provoditi. Po završetku simulacije dobiveni su rezultati za sile i pomake, koji su preračunati u naprezanja i deformacije pomoću izraza (1.5) i (1.6). Maksimalne sile određene su kao izračunata kontaktna sila.

Tablica 8. Podaci o konačnim elementima za pojedine modele

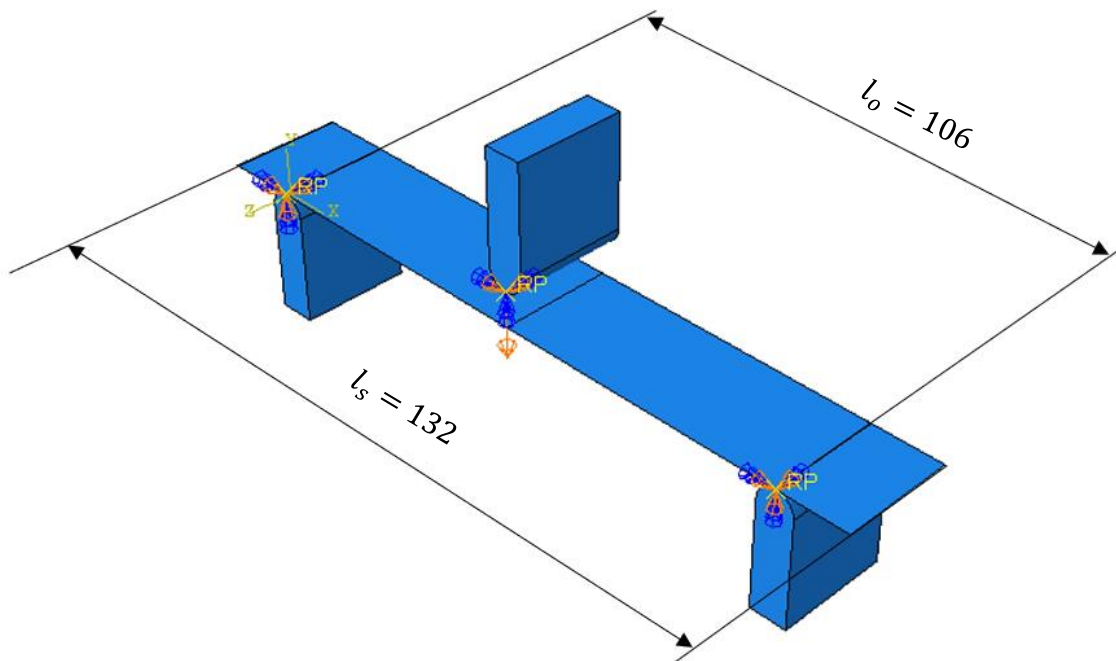
Model	Dio modela	Vrsta elementa	Broj elemenata	Veličina elemenata, mm	Broj čvorova
LLLLL	Ispitno tijelo	S4R	544	2	621
	Oslonci	R3D4	104	3	106
SSSSS	Ispitno tijelo	S4R	208	2	238
	Oslonci	R3D4	104	3	106
SLLLS	Ispitno tijelo	S4R	400	2	459
LSLLS					
LLSSL	Oslonci	R3D4	104	3	106



Slika 21. Mreža elemenata ispitnog tijela za savojno ispitivanje epoksidne smole ojačane lanenim vlaknima, dimenzije su u [mm]



Slika 22. Mreža elemenata oslonaca i valjka za opterećivanje, dimenzije su u [mm]



Slika 23. Rubni uvjeti i zadani pomak numeričkog modela za savojno ispitivanje, prikazana je epruveta za lan, dimenzije su u [mm]

4. REZULTATI I RASPRAVA

4.1. Rezultati rasteznog ispitivanja

Nakon provedenog rasteznog ispitivanja analizirani su dobiveni podaci sila i produljenja. S obzirom na prethodno izmjerene početne dimenzije ispitnih tijela prikazane u Tablici 3., naprezanje se računa iz izraza (1.3), pri čemu je A početna površina poprečnog presjeka, dok se rastezna čvrstoća σ_m određuje uvrštavanjem maksimalne sile F_m u isti izraz [35]:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1.3)$$

Deformacija se računa prema izrazu (1.4), gdje je početna duljina $l_{r,0} = 50$ mm, dok se prekidna deformacija ε_{kr} dobiva uvrštavanjem konačnog produljenja Δl_k u isti izraz [35]:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_{r,0}} * 100 \%. \quad (1.4)$$

Modul elastičnosti određuje se u približno linearnom području iz nagiba pravca. Budući da je deformacija izračunata iz (1.4) izražena u postocima, kako bi se dobio modul, nagib pravca iz dijagrama treba pomnožiti sa 100. U okviru softverske obrade podataka, za određivanje modula potrebno je definirati približno linearni interval elastičnog odziva koji se ponaša u skladu s Hookeovim modelom gdje vrijedi da je $\sigma = E\varepsilon$. U Tablici 9. prikazane su izračunate rastezne čvrstoće za pojedine epruvete, kao i njihove srednje vrijednosti za pojedine ploče. Dani su i pripadni moduli elastičnosti te iznosi prekidnih istezanja u postocima.

Tablica 9. Svojstva dobivena rasteznim ispitivanjem

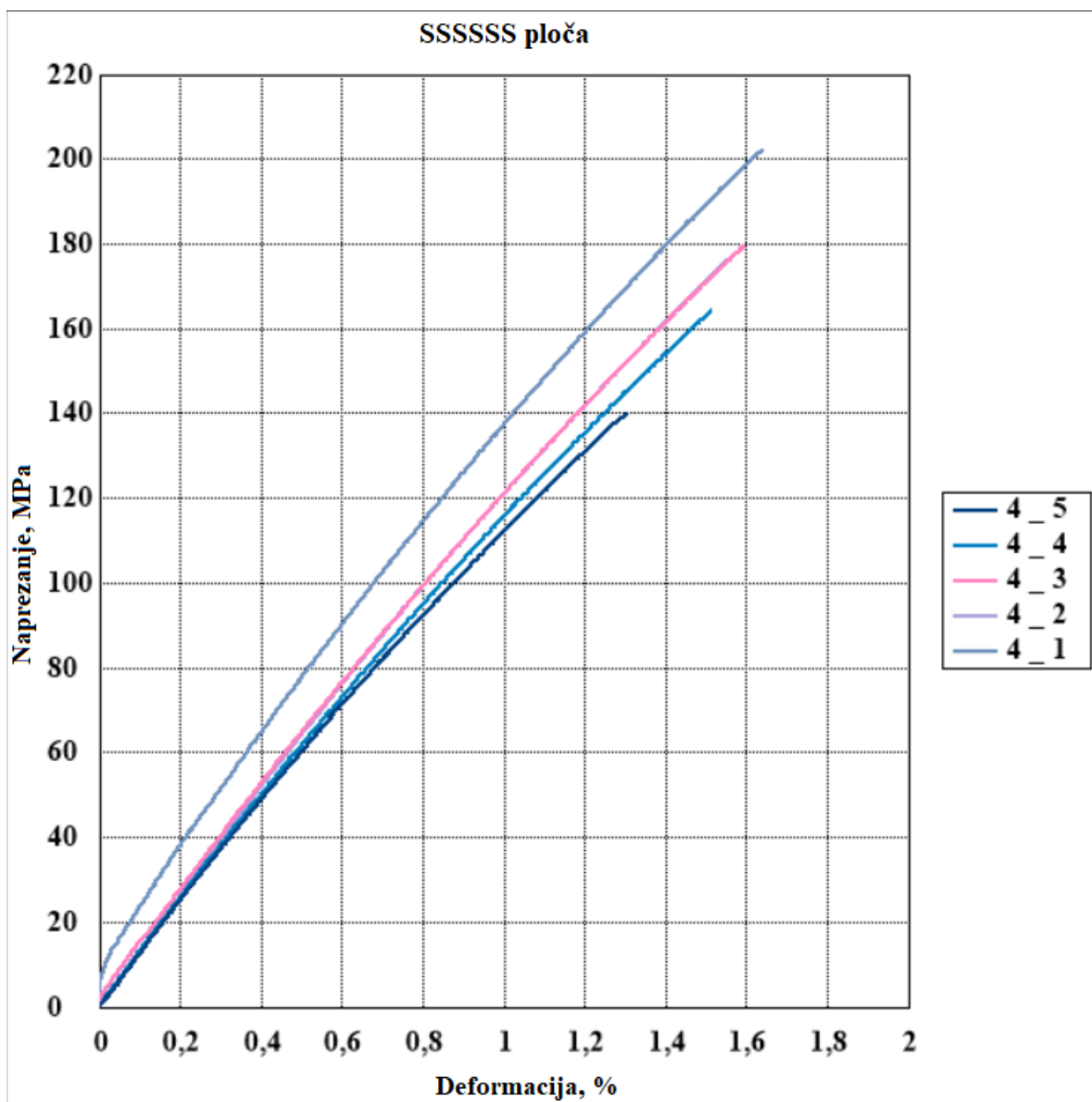
	E , MPa	Srednja vrijednost E , MPa	σ_m , MPa	Srednja vrijednost σ_m , MPa	ε_{kr} , %	Srednja vrijednost ε_{kr} , %
1 _ 1	6155,95	5274,31	64,86	57,04	1,88	1,84
1 _ 2	5577,88		57,10		1,62	
1 _ 3	4969,54		54,88		2,04	
1 _ 4	4620,48		50,27		1,76	
1 _ 5	5047,69		58,08		1,92	
2 _ 1	4732,85	5073,73	60,21	59,64	1,94	1,76
2 _ 2	5974,17		69,17		1,84	

2 _ 3	3635,32		46,67		1,82	
2 _ 4	5201,66		56,86		1,6	
2 _ 5	5824,67		65,29		1,58	
3 _ 1	5727,85		63,84		1,78	
3 _ 2	6582,89		79,13		2,12	
3 _ 3	5795,47	5853,54	73,69	72,25	2,38	2,23
3 _ 4	6124,11		75,89		2,28	
3 _ 5	5037,38		68,70		2,58	
4 _ 1	12572,90		202,34		1,64	
4 _ 2	12872,75		176,37		1,56	
4 _ 3	12934,10	12756,88	179,35	172,46	1,6	1,52
4 _ 4	12757,33		164,37		1,52	
4 _ 5	12647,30		139,85		1,3	
5 _ 1	5120,04		70,65		3	
5 _ 2	4432,04		56,42		2,02	
5 _ 3	4204,97	4695,75	57,70	61,70	2,9	2,79
5 _ 4	4783,92		62,22		3,08	
5 _ 5	4937,77		61,49		2,96	

Iz Tablice 9. vidljivo je da su pri rasteznom opterećenju svojstva kompozita ojačanog samo staklenim vlaknima superiorna u odnosu na svojstva svih ostalih ispitanih kompozita. Modul je pritom oko 2,5 puta viši, dok mu je čvrstoća oko 3 puta viša. Ova razlika u svojstvima nije posljedica samo tipa vlakana, već i orijentacije tkanja. Naime, lanena vlakna nisu orijentirana u smjeru opterećivanja, već su zakrenuta za 45°, dok je stakleno tkanje orijentirano pod 0° i 90° u odnosu na smjer opterećenja. Kompozit ojačan samo lanenim vlaknima je 84 % istezljiviji od kompozita ojačanog staklenim vlaknima. Istezljiviji je i od svih hibrida, no čvrstoća mu nije najniža, već su hibridi sa slaganjem SLLLLS i LSLLSL čak malo niže čvrstoće. Premda je pri ovom ispitivanju naprezanje jednoosno, svojstva kompozita s 2 sloja staklenih i 4 sloja lanenih razlikuju se za različiti raspored vlakana. Rastezni moduli svih hibrida su između 5 i 6 GPa, no rastezna čvrstoća kompozita sa staklenim vlaknima u sredini je 26 % viša od kompozita sa

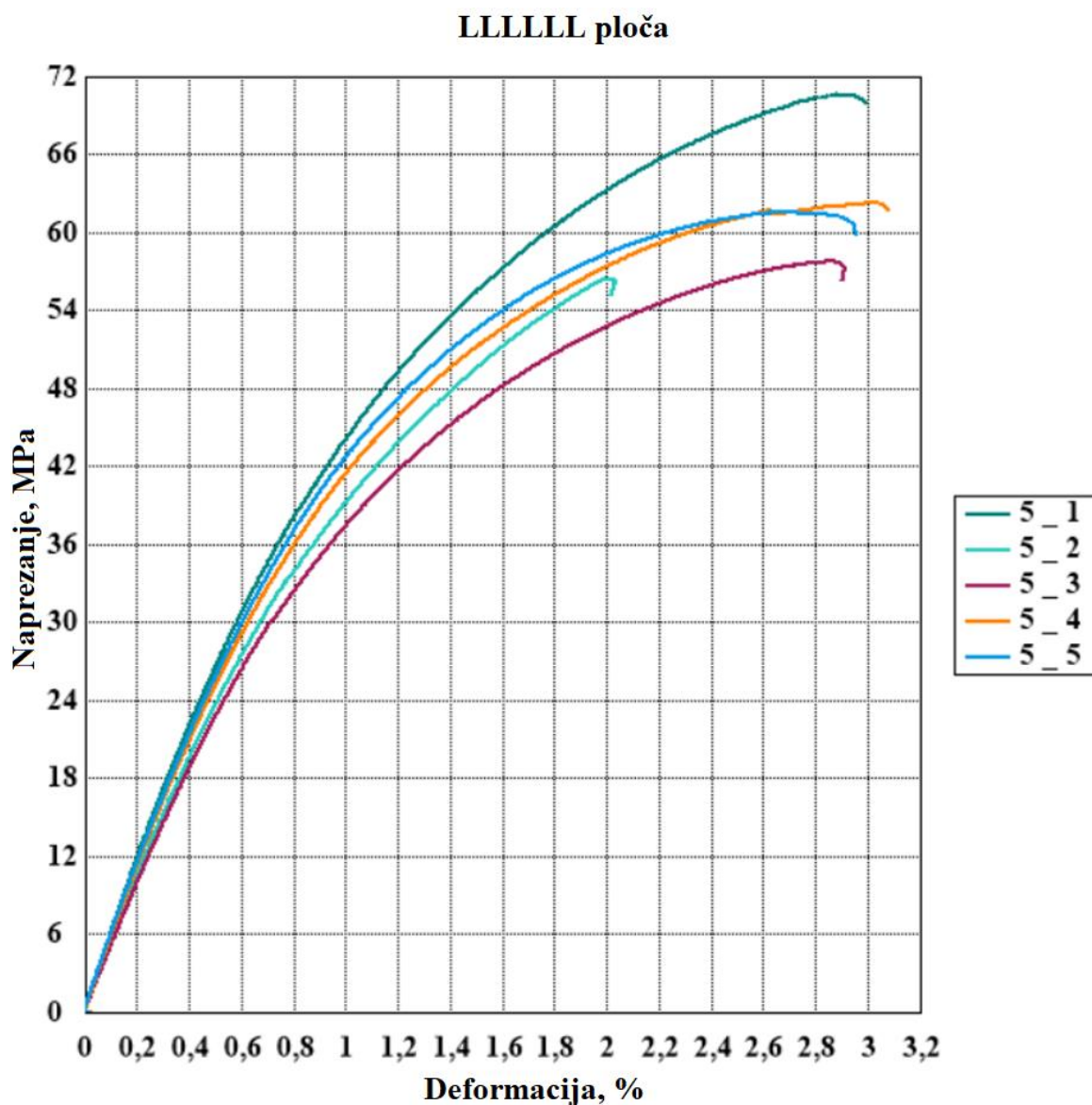
staklom u površinskom sloju. Iznenadujuće je da su mu i istezljivost i modul najviši od svih hibrida.

Na Slikama 24. do 27. prikazani su dijagrami naprezanje-istezanje za pojedine rasporede slojeva sa svim pripadajućim ispitnim tijelima, dok je na Slici 29. prikazana usporedba srednjih vrijednosti krivulja za sve ploče.



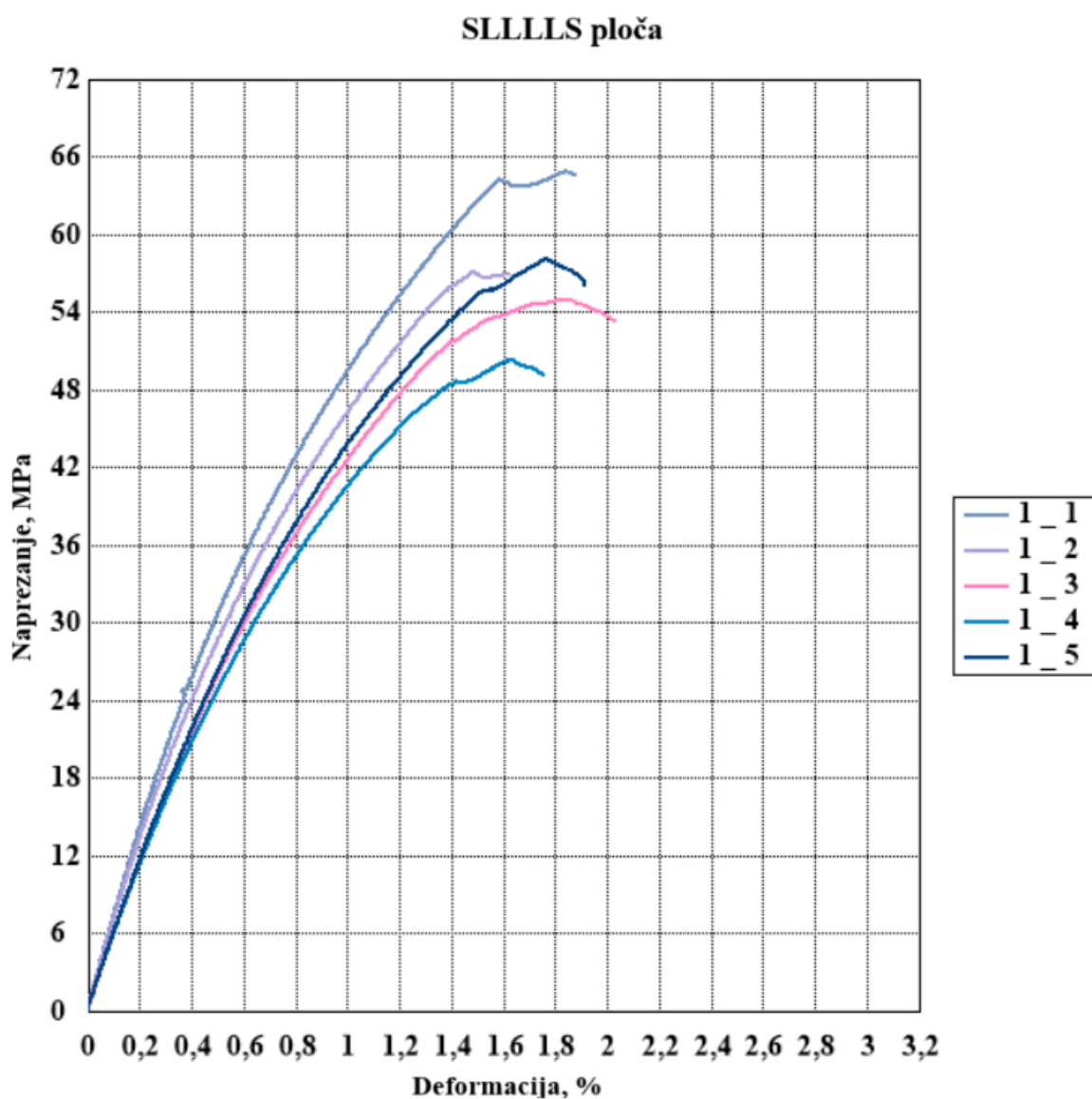
Slika 24. Dijagrami rastezno naprezanje-istezanje za SSSSS ploču

Iz Slike 24. vidljiva je razlika u rezultatima od otprilike 62 MPa između najniže i najviše vrijednosti rastezne čvrstoće. Razlika u deformaciji iznosi oko 0,3 % između najniže i najviše vrijednosti. Standardne devijacije ove ploče iznose 134,68 MPa za modul elastičnosti, 20,42 MPa za rasteznu čvrstoću te 0,12 % za prekidno istezanje.



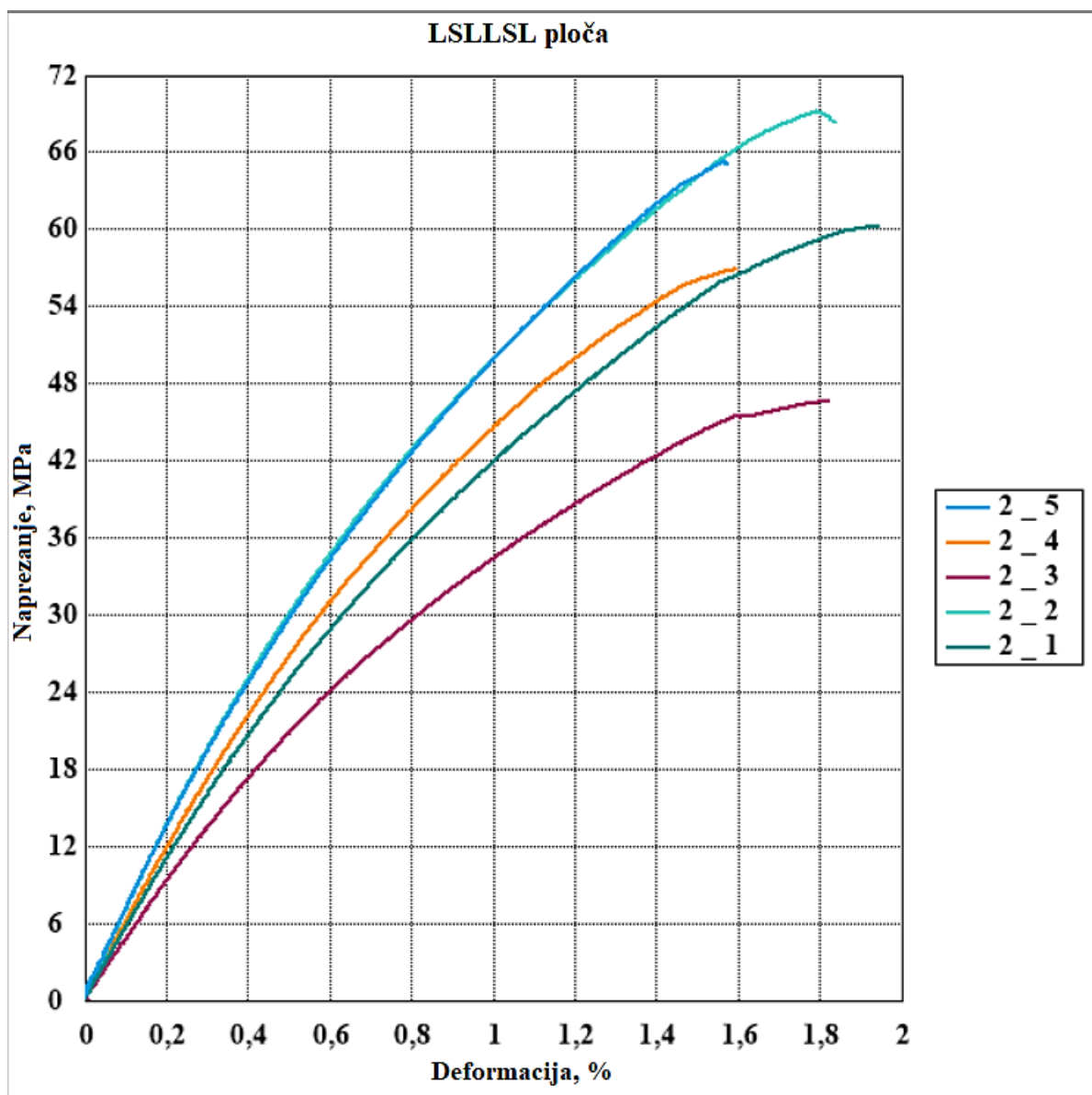
Slika 25. Dijagrami rastezno naprezanje-istezanje za LLLLLL ploču

Iz Slike 25. vidljiva je razlika u rezultatima od otprilike 14 MPa između najniže i najviše vrijednosti rastezne čvrstoće. Razlika u deformaciji iznosi oko 1 % između najniže i najviše vrijednosti. Standardne devijacije ove ploče iznose 333,7 MPa za modul elastičnosti, 4,99 MPa za rasteznu čvrstoću te 0,39 % za prekidno istezanje.



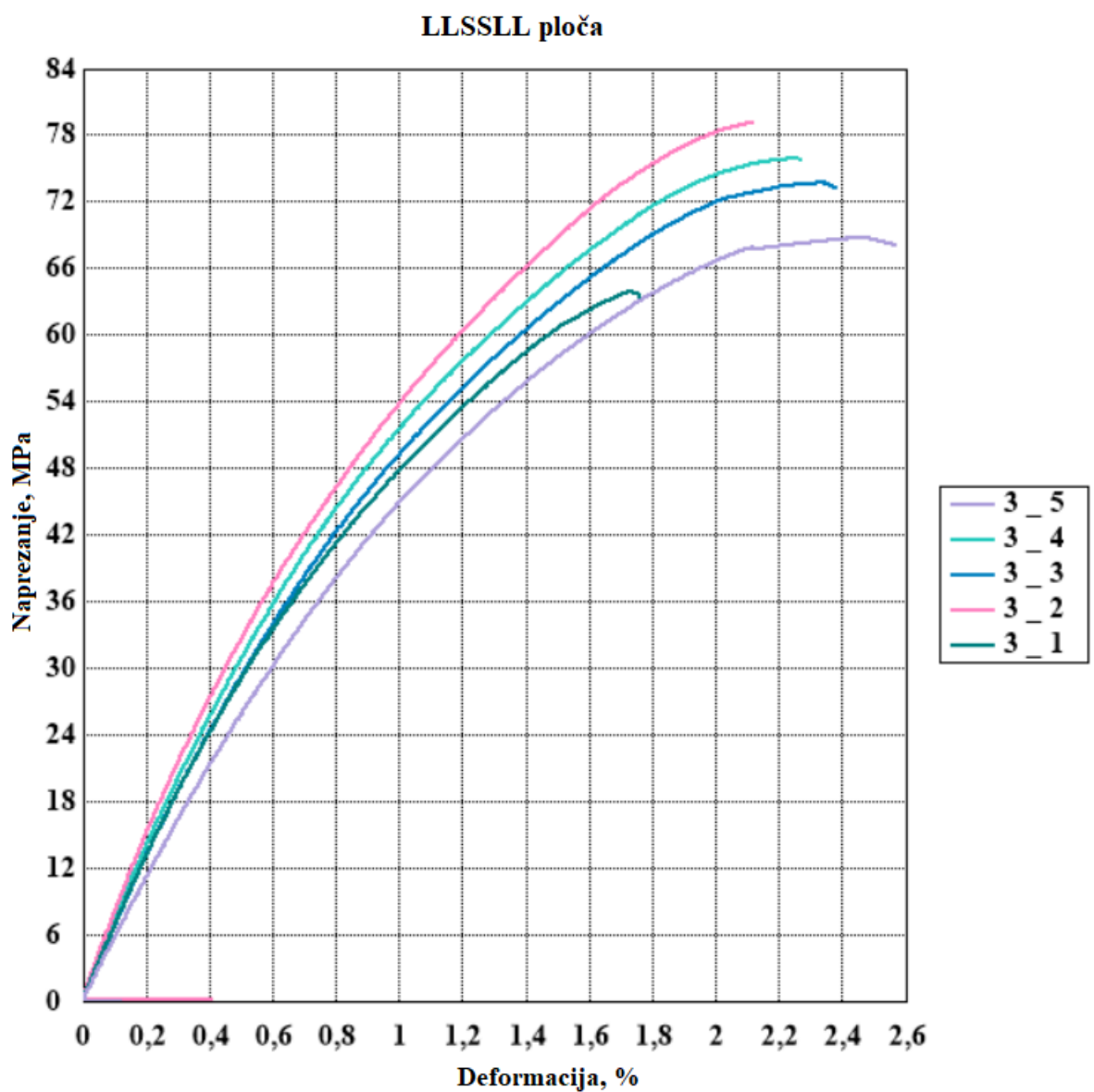
Slika 26. Dijagrami rastezno naprezanje-istezanje za SLLLLS ploču

Iz Slike 26. vidljiva je razlika u rezultatima od otprilike 14 MPa između najniže i najviše vrijednosti rastezne čvrstoće. Razlika u deformaciji iznosi oko 0,4 % između najniže i najviše vrijednosti. Standardne devijacije ove ploče iznose 536,88 MPa za modul elastičnosti, 4,75 MPa za rasteznu čvrstoću te 0,14% za prekidno istezanje.



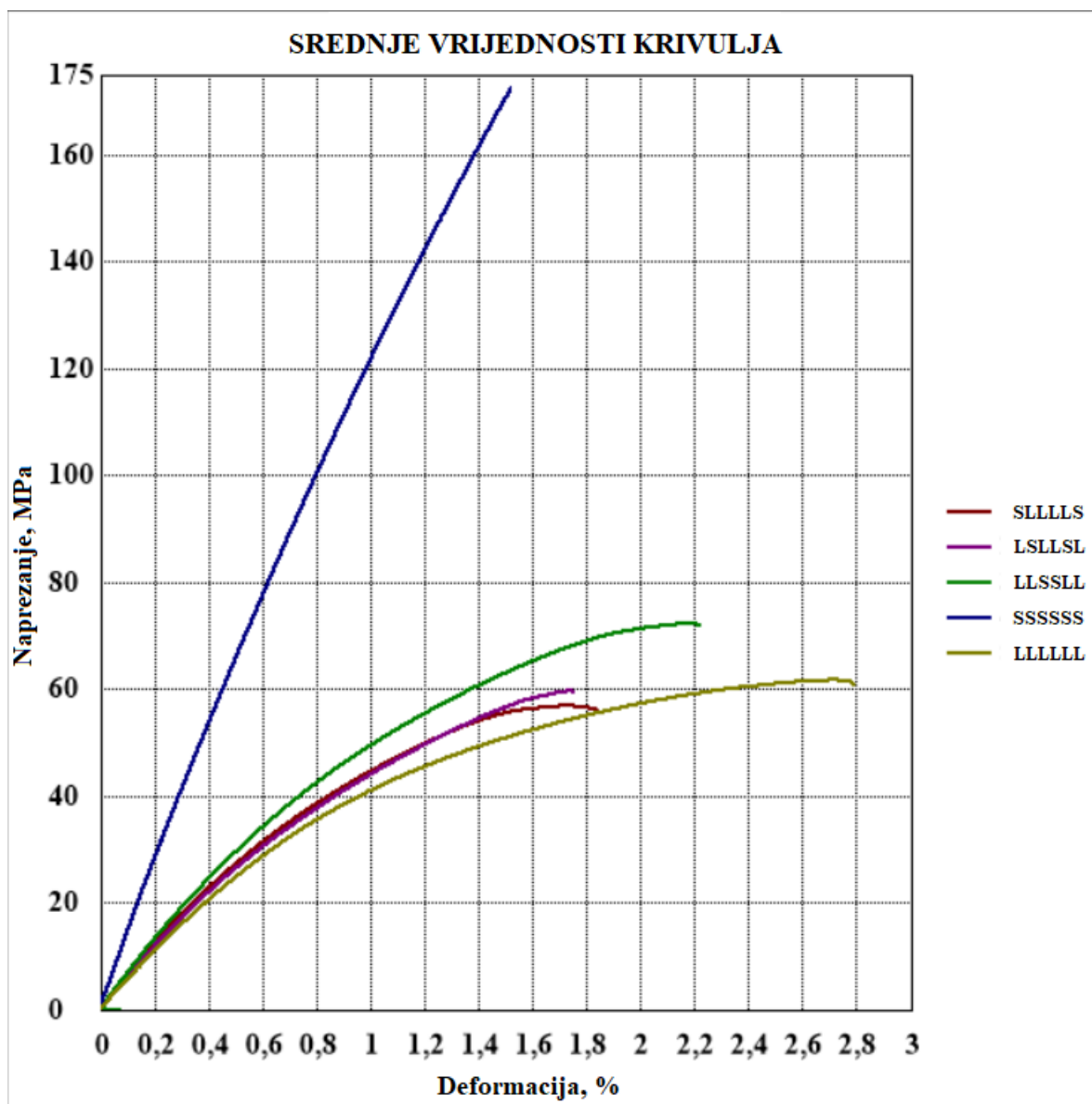
Slika 27. Dijagrami rastezno naprezanje-istezanje za LSLLSL ploču

Iz Slike 27. vidljiva je razlika u rezultatima od otprilike 22 MPa između najniže i najviše vrijednosti rastezne čvrstoće. Razlika u deformaciji iznosi oko 0,3 % između najniže i najviše vrijednosti. Standardne devijacije ove ploče iznose 845,73 MPa za modul elastičnosti, 7,73 MPa za rasteznu čvrstoću te 0,14% za prekidno istezanje.



Slika 28. Dijagrami rastezno naprezanje-istezanje za LLSLL ploču

Iz Slike 28. vidljiva je razlika u rezultatima od otprilike 15 MPa između najniže i najviše vrijednosti rastezne čvrstoće. Razlika u deformaciji iznosi oko 0,8 % između najniže i najviše vrijednosti. Standardne devijacije ove ploče iznose 508,03 MPa za modul elastičnosti, 5,4 MPa za rasteznu čvrstoću te 0,27 % za prekidno istežanje.



Slika 29. Dijagrami rastezno naprezanje-istezanje za pojedine ploče

Pregled srednjih vrijednosti svih pet krivulja dan je na Slici 29. Iz nje se jasno vidi da su svojstva hibrida između svojstava kompozita sa samo jednim tipom ojačala. Dodavanjem približno 10 % masenog udjela staklenih i približno 20 % lanenih vlakana, dobiva se kompozit koji pri rasteznom opterećenju nije značajno bolji od lanenog. No treba imati na umu i veliku razliku u gustoći vlakana, pri čemu je gustoća staklenih vlakana oko dva puta viša. Stoga je volumen lanenih vlakana gotovo četverostruk u odnosu na staklena. I ovdje je vidljivo da je kompozit sa staklenim vlaknima u sredini krući, čvršći i istežljiviji.

4.2. Rezultati savojnog ispitivanja

Savojnim ispitivanjem mjere se sile i progib. Dobiveni podaci analizirani su na sličan način kao i kod rasteznih ispitivanja. Naprezanje se u ovom slučaju računa prema izrazu (1.5), pri čemu je b širina ispitnog tijela, h debljina, a l_o razmak između oslonaca, a uvrštavanjem maksimalne sile F_{max} dobiva se savojna čvrstoća σ_f :

$$\sigma = \frac{3Fl_o}{2bh^2}. \quad (1.5)$$

Deformacija se kod savojnog opterećenja računa prema izrazu (1.6), gdje su f progib, h debljina i L razmak između oslonaca. Konačna deformacija računa se uvrštavanjem vrijednosti progiba prilikom pucanja ispitnog tijela:

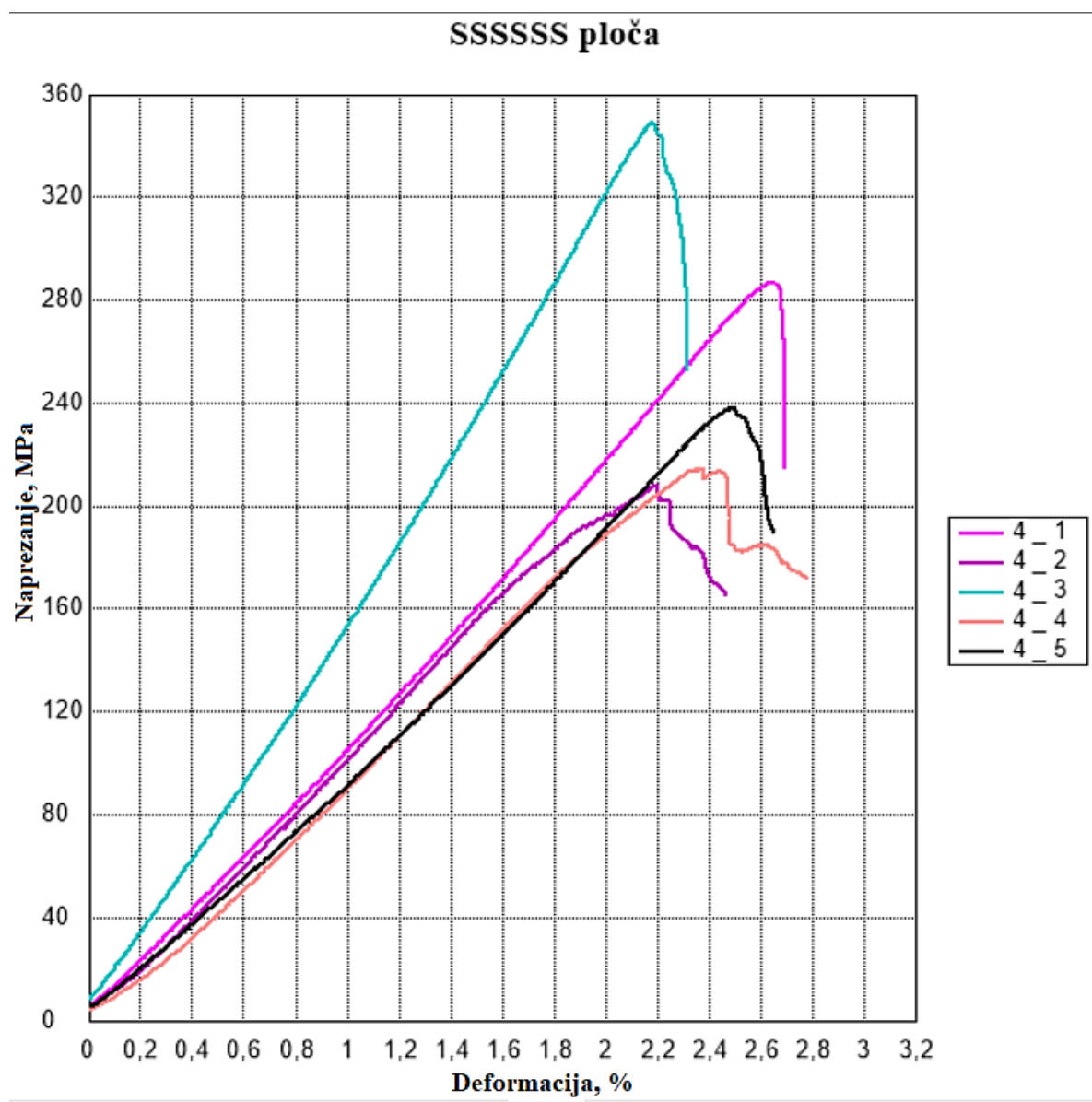
$$\varepsilon = \frac{6fh}{l_o^2} * 100 \%. \quad (1.6)$$

Tablica 10. Svojtva dobivena savojnim ispitivanjem

	E_f , MPa	Srednja vrijednost E_f , MPa	σ_f , MPa	Srednja vrijednost σ_f , MPa	ε_{ks} , %	Srednja vrijednost ε_{ks} , %
1 _ 1	5308,52	5184,87	92,07	86,70	1,98	1,89
1 _ 2	4775,97		82,39		1,84	
1 _ 3	5680,27		89,78		1,85	
1 _ 4	4619,20		79,01		1,91	
1 _ 5	5540,38		90,26		1,85	
2 _ 1	5478,98	5263,72	119,42	117,34	3,39	3,7
2 _ 2	5105,37		112,79		3,80	
2 _ 3	5431,64		124,45		3,94	
2 _ 4	4897,21		112,30		3,64	
2 _ 5	5405,42		117,74		3,75	
3 _ 1	3181,57	2935,43	81,19	71,25	4,34	3,5
3 _ 2	3329,15		83,93		3,82	
3 _ 3	3046,05		78,07		4,37	
3 _ 4	2495,29		56,87		2,56	

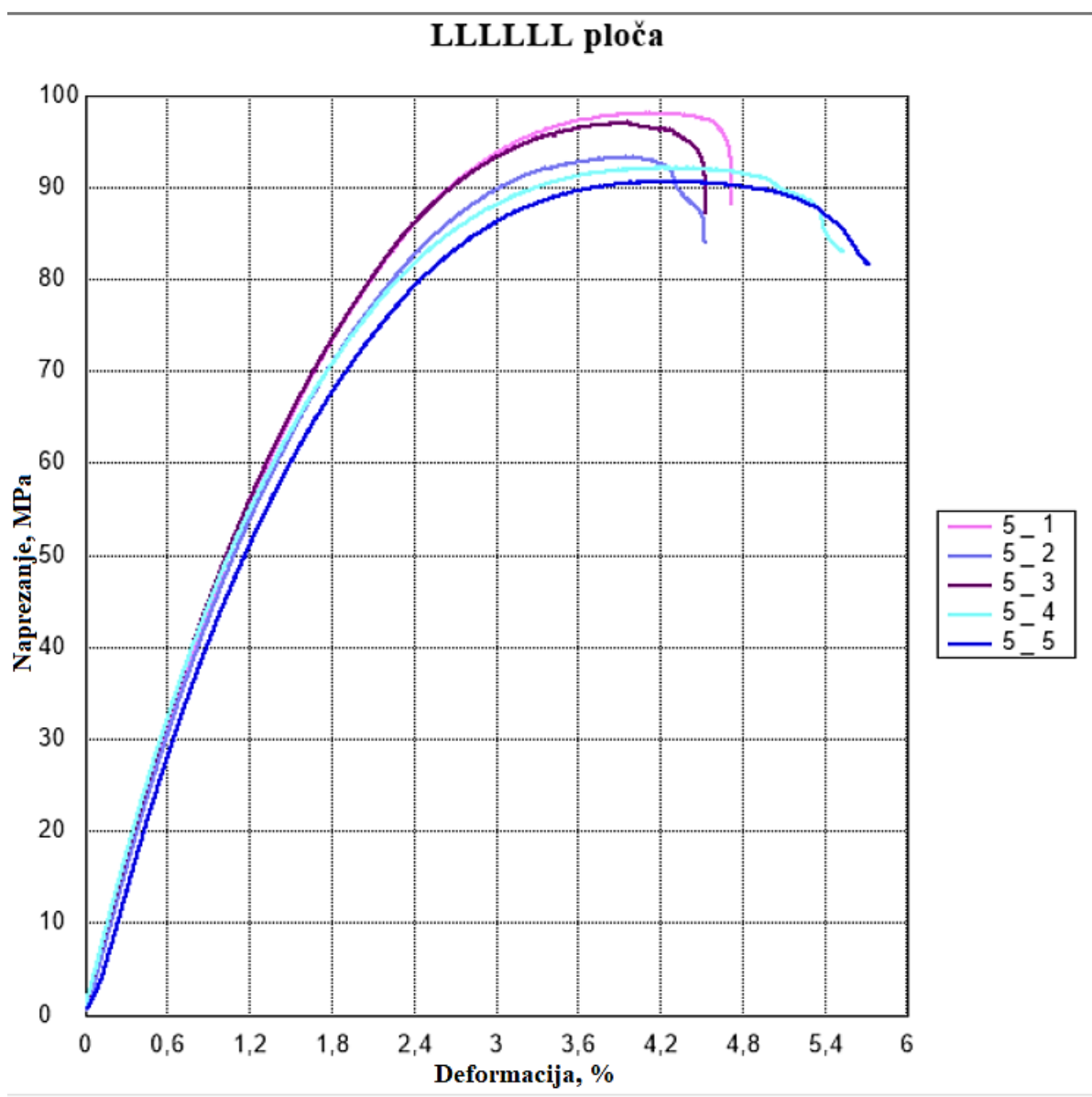
3_5	2625,07		56,19		2,42	
4_1	10015,31	10288,70	286,96	259,58	2,66	2,39
4_2	9818,22		208,14		2,21	
4_3	14029,26		349,57		2,18	
4_4	8861,97		214,96		2,38	
4_5	8718,73		238,26		2,51	
5_1	3990,12	3797,36	98,07	94,26	4,04	4,06
5_2	3772,75		93,30		3,96	
5_3	3979,27		97,05		3,96	
5_4	3690,01		92,16		4,23	
5_5	3554,65		90,70		4,12	

Kod savojnog ispitivanja, kao i kod rasteznog, najviši modul i čvrstoću ima kompozit sa staklenim vlaknima, no međutim najslabiji je onaj sa staklenim vlaknima u sredini. Očekivano je da će u slučaju kada su staklena vlakna u sredini, ona preuzeti najmanje naprezanja u usporedbi s drugim hibridima, jer su najjača vlakna u blizini neutralne ravnine. Ipak, nije očekivano da će ovaj kompozit biti slabiji od onog ojačanog samo sa lanom. Kompozit koji se pokazao u čisto rasteznom ispitivanju najboljim hibridom, u ovom slučaju najlošiji je od svih kompozita. Međutim, suprotno očekivanjima, kompozit sa staklenim vlaknima u površinskim slojevima nije se pokazao najboljim, već onaj sa slaganjem LSLLSL. Moduli ovih dvaju kompozita su približno isti, no čvrstoća kompozita sa slaganjem LSLLSL je 35 % viša od onog s redoslijedom SLLLLS. Kompozit sa staklom u površinskim slojevima najmanje je deformabilan, čak manje od kompozita s isključivo staklenim vlaknima koji je deformabilniji za čak 26 %. Na Slikama 30. do 34. prikazani su dijagrami savojno naprezanje-istezanje za pojedine rasporede slojeva sa svim pripadajućim ispitnim tijelima, dok je na Slici 35. prikazana usporedba srednjih vrijednosti krivulja za sve ploče.



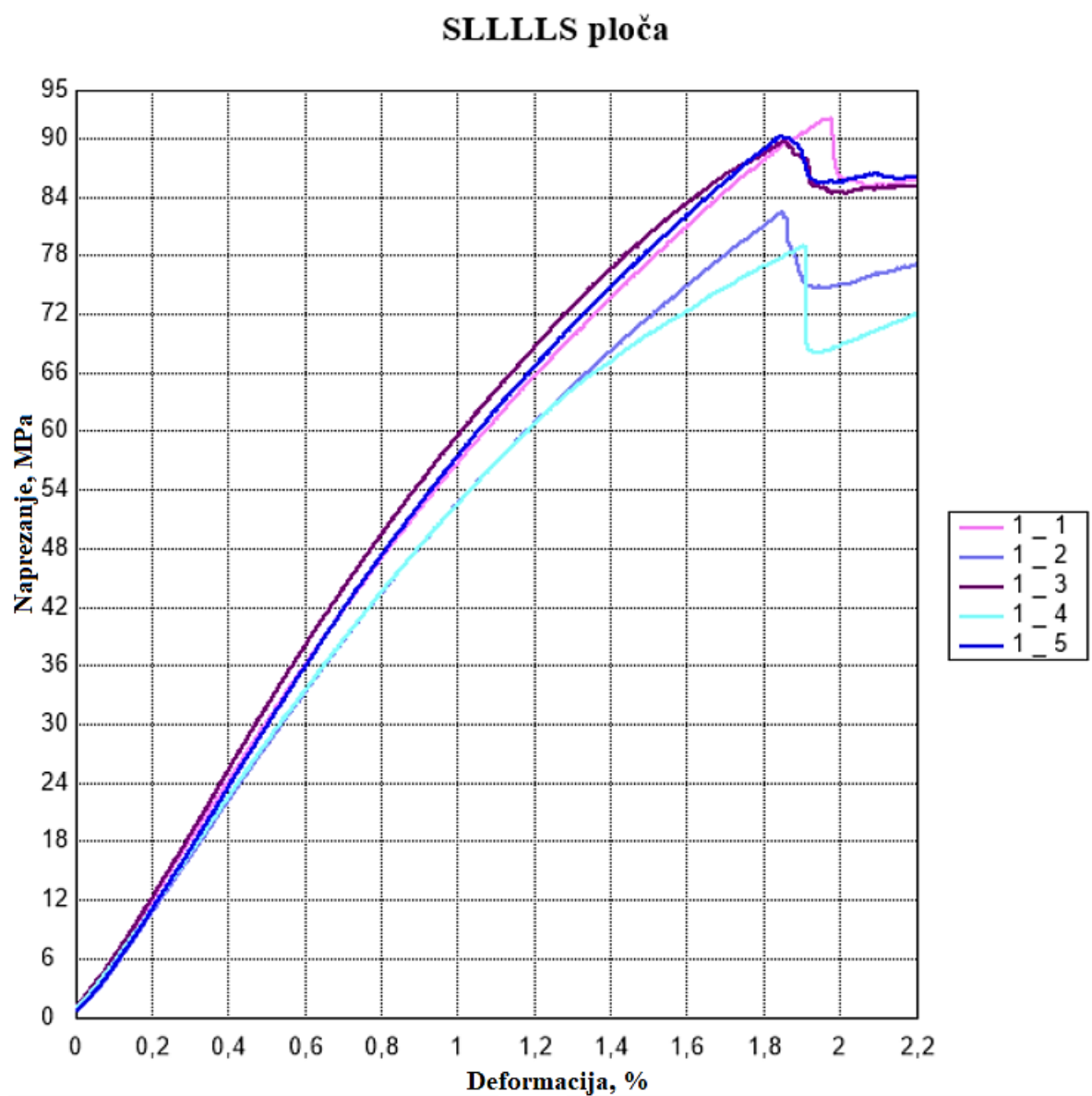
Slika 30. Dijagrami savojno naprezanje-istezanje za SSSSSSS ploču

Iz Slike 30. vidljiva je razlika u rezultatima od otprilike 141 MPa između najniže i najviše vrijednosti rastezne čvrstoće. Razlika u deformaciji iznosi oko 0,5 % između najniže i najviše vrijednosti. Standardne devijacije ove ploče iznose 1938,47 MPa za modul elastičnosti, 52,8 MPa za rasteznu čvrstoću te 0,18 % za prekidno istezanje.



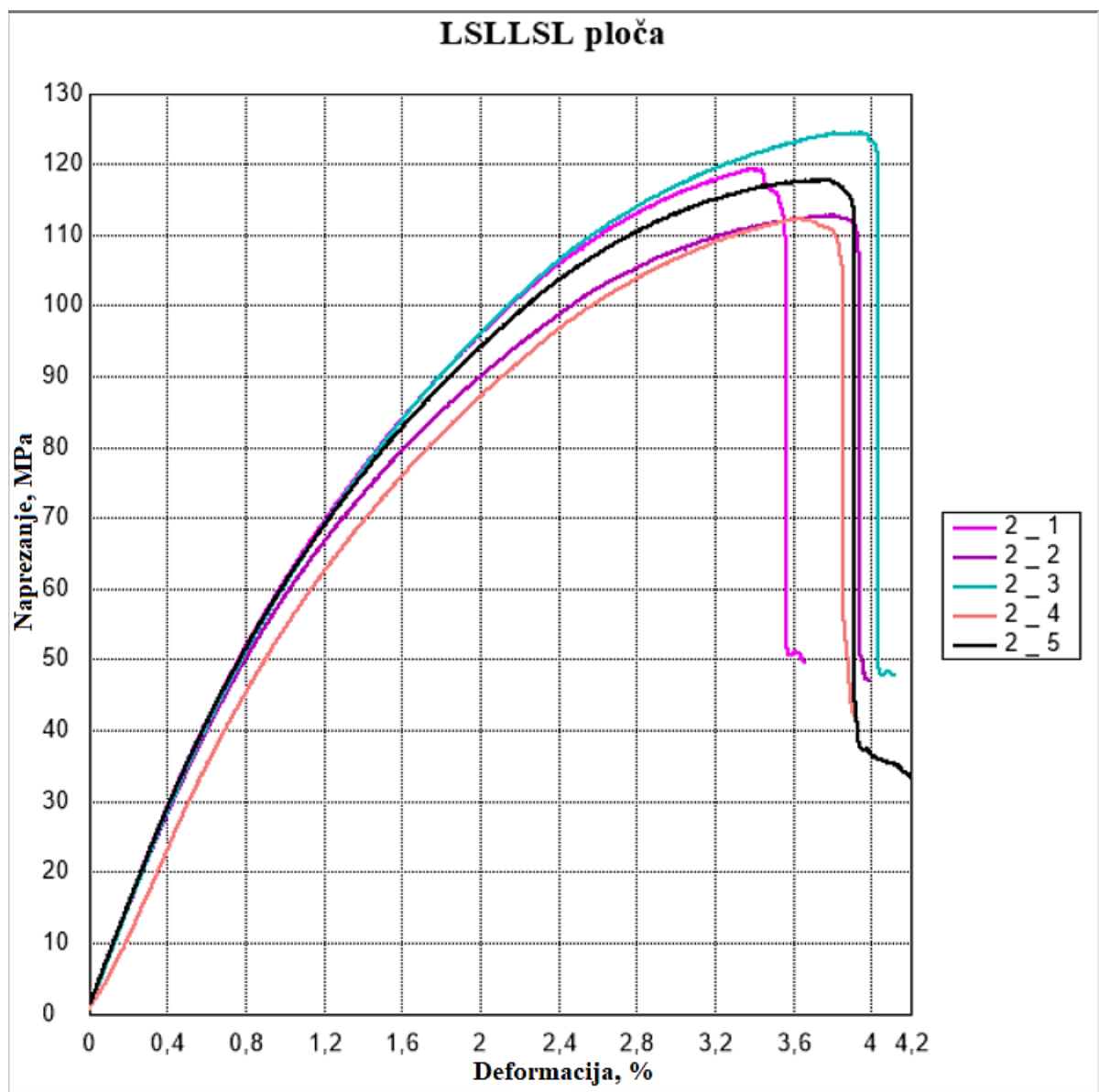
Slika 31. Dijagrami savojno naprezanje-istezanje za LLLLLL ploču

Iz Slike 31. vidljiva je razlika u rezultatima od otprilike 7 MPa između najniže i najviše vrijednosti rastezne čvrstoće. Razlika u deformaciji iznosi oko 0,3 % između najniže i najviše vrijednosti. Standardne devijacije ove ploče iznose 168,1 MPa za modul elastičnosti, 2,84 MPa za rasteznu čvrstoću te 0,1 % za prekidno istezanje.



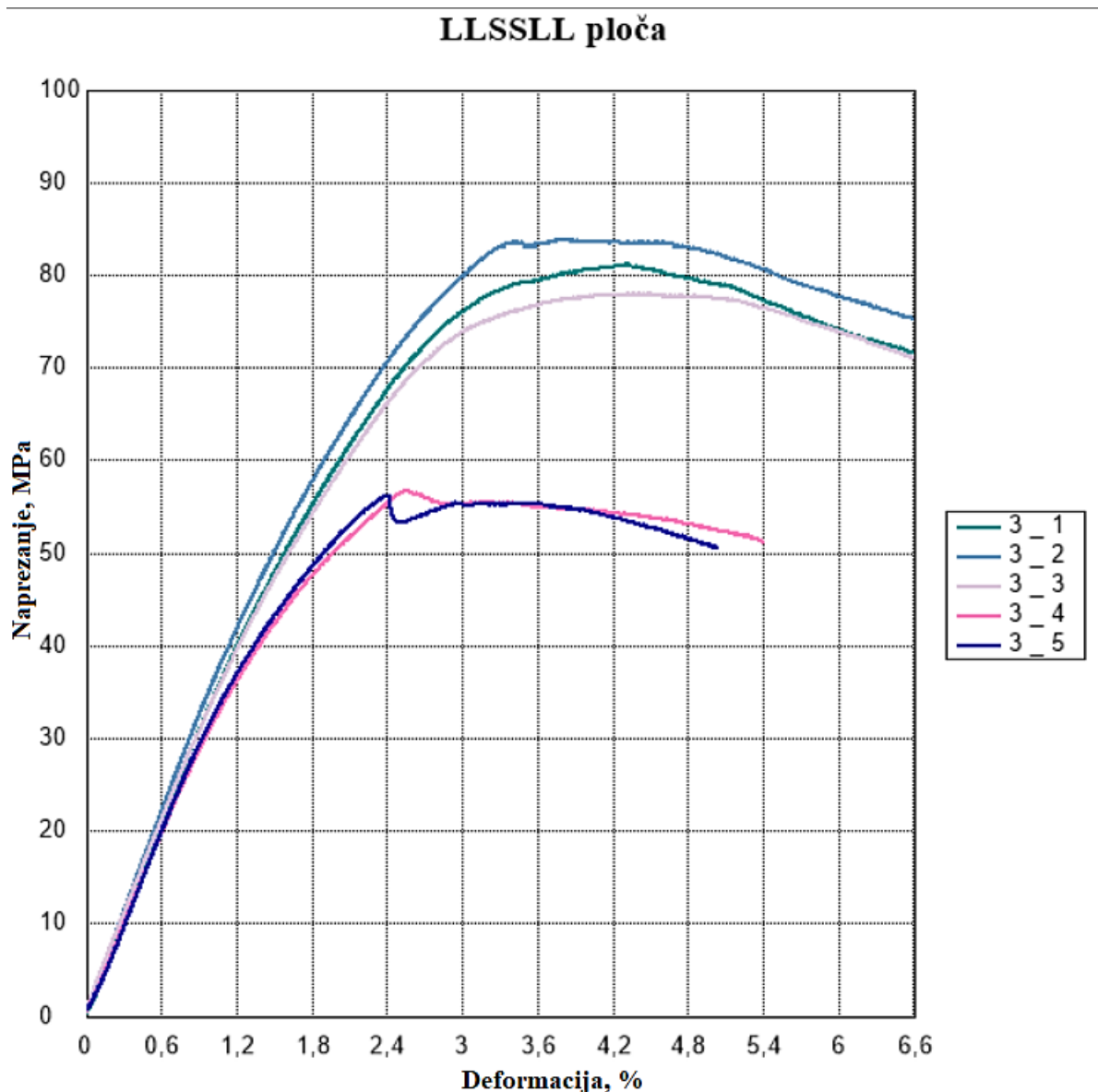
Slika 32. Dijagrami savojno naprezanje-istezanje za SLLLLS ploču

Iz Slike 32. vidljiva je razlika u rezultatima od otprilike 13 MPa između najniže i najviše vrijednosti rastezne čvrstoće. Razlika u deformaciji iznosi oko 0,14 % između najniže i najviše vrijednosti. Standardne devijacije ove ploče iznose 418,16 MPa za modul elastičnosti, 5,1 MPa za rasteznu čvrstoću te 0,05 % za prekidno istežanje.



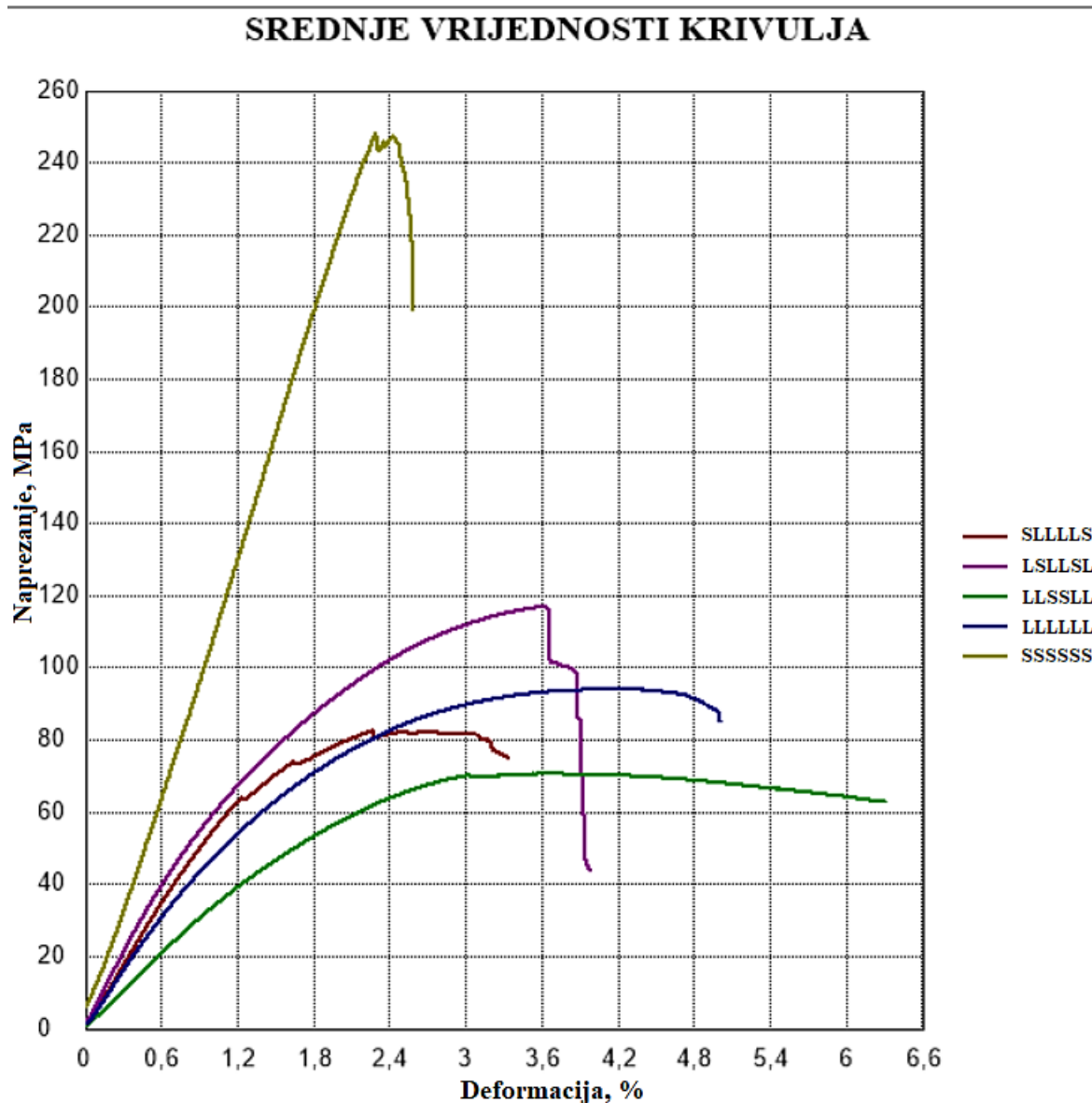
Slika 33. Dijagrami savojno naprezanje-istezanje za LSLSSL ploču

Iz Slike 33. vidljiva je razlika u rezultatima od otprilike 12 MPa između najniže i najviše vrijednosti rastezne čvrstoće. Razlika u deformaciji iznosi oko 0,5 % između najniže i najviše vrijednosti. Standardne devijacije ove ploče iznose 225,4 MPa za modul elastičnosti, 4,5 MPa za rasteznu čvrstoću te 0,18 % za prekidno istezanje.



Slika 34. Dijagrami savojno naprezanje-istezanje za LLSLL ploču

Iz Slike 34. vidljiva je razlika u rezultatima od otprilike 27 MPa između najniže i najviše vrijednosti rastezne čvrstoće. Razlika u deformaciji iznosi oko 2 % između najniže i najviše vrijednosti. Standardne devijacije ove ploče iznose 321,83 MPa za modul elastičnosti, 12,16 MPa za rasteznu čvrstoću te 0,85 % za prekidno istežanje.



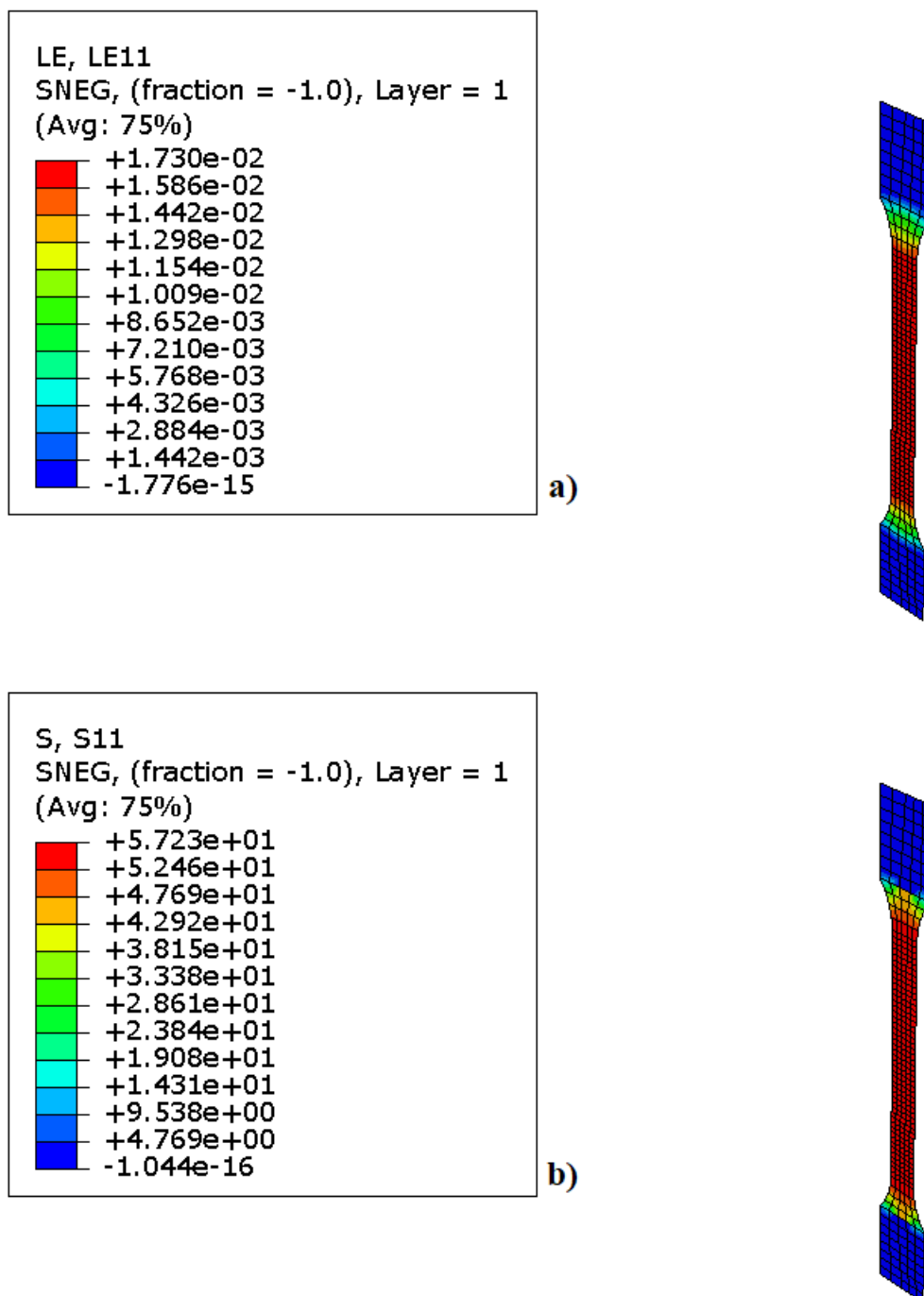
Slika 35. Dijagrami savojno naprezanje-istezanje za pojedine ploče

Na Slici 35. vidljivo je da je kompozit sa staklenim ojačanjem najboljih svojstava pri savojnom opterećenju, dok je hibrid sa staklenim vlaknima u sredini najniže čvrstoće i modula, ali pokazuje višu deformabilnost od preostalih kompozita.

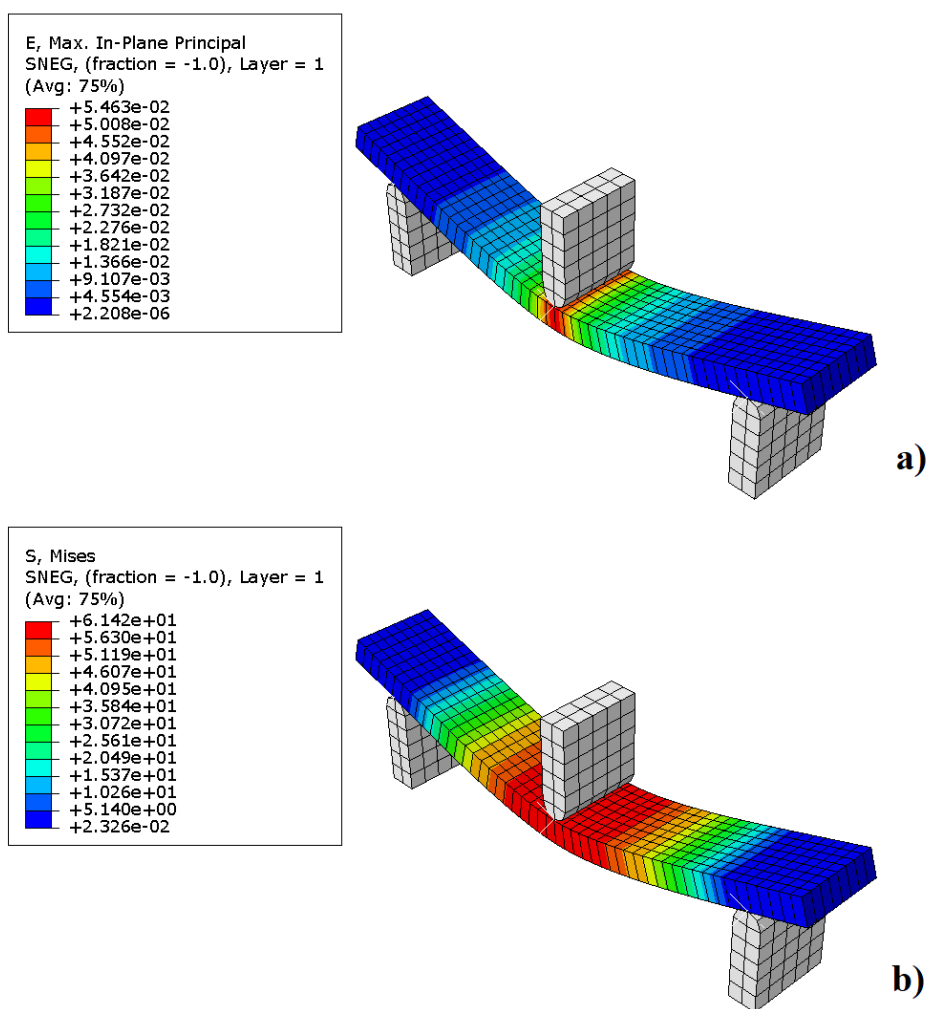
4.3. Rezultati simulacije za rastezno i savojno ispitivanje

Po završetku simulacije dobiveni su podaci o naprezanjima i deformacijama te su prikazane njihove raspodjele po ispitnim tijelima. Na Slici 36. prikazana je raspodjela naprezanja i deformacija kod rasteznog ispitivanja za ispitno tijelo s rasporedom slojeva LSLLSL, dok je na

Slici 37. prikazana raspodjela kod savojnog ispitivanja za ispitno tijelo s rasporedom slojeva LLSSLL.



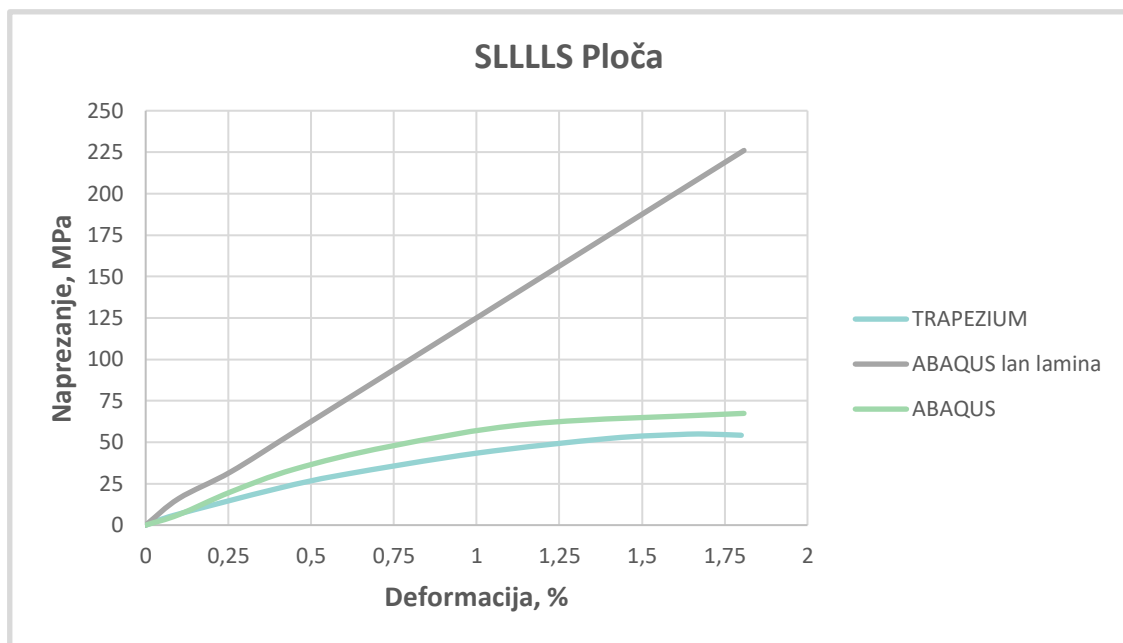
Slika 36. Raspodjela a) deformacije [mm/mm] i b) naprezanja [MPa] u prvom sloju (L) kod rasteznog ispitivanja za ispitno tijelo s rasporedom slojeva LSLLSL



Slika 37. Raspodjela a) deformacije [mm/mm] i b) naprezanja [MPa] u prvom sloju (L) kod savojnog ispitivanja za ispitno tijelo s rasporedom slojeva LLSSL uz prikaz debljine uz vizualizaciju debljine ljuskastog konačnog elementa

4.4. Usporedba numeričke simulacije i eksperimenta za rastezno ispitivanje

Na Slikama 38. do 42. dana je usporedba rezultata rasteznog ispitivanja dobivenih iz Abaqusa i pratećeg softvera kidalice, Trapeziuma. Oznaka ABAQUS lan lamina odnosi se na rezultate dobivene modeliranjem lana bez plastičnosti. U slučaju kompozita pripremljenih od samo lanenih vlakana te za hibridne kompozite, komentirano je poklapanje rezultata samo za modeliranje materijala kao izotropno elastičnog s plastičnim ponašanjem. Model s ortotropnim materijalom prikazan je kako bi se stekao dojam o potrebi modeliranja plastičnosti, ali nije dodatno komentiran zbog vidljive razlike u rezultatima.



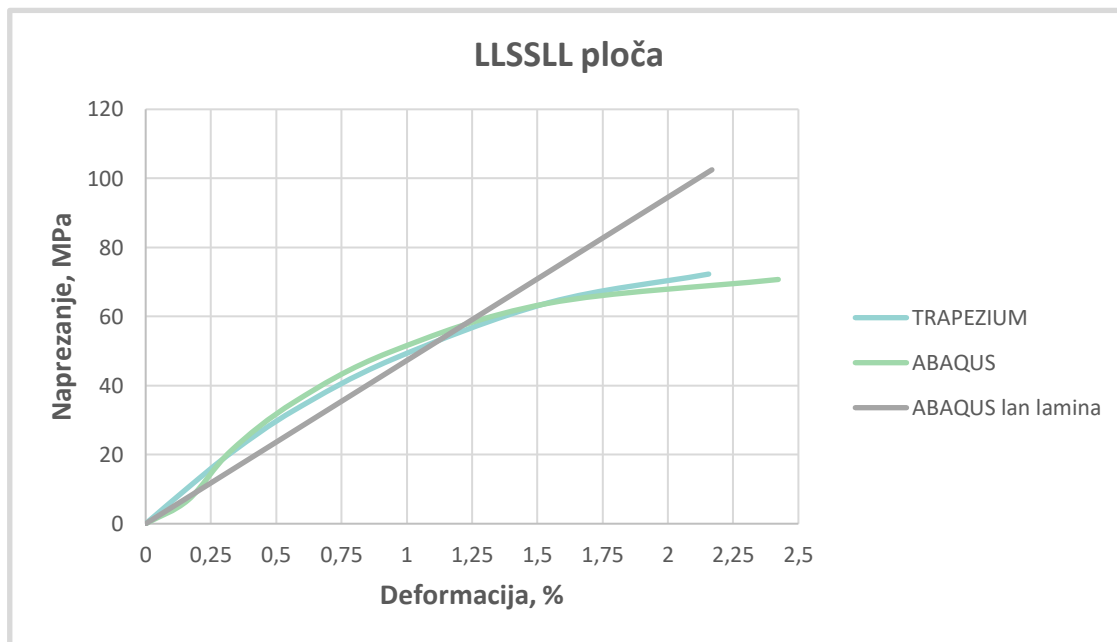
Slika 38. Usporedba dijagrama rastezno naprezanje-istezanje u Abaqusu i Trapeziumu za ploču SLLLLS

Na Slici 38. prikazana je usporedba rezultata za ploču s rasporedom slojeva SLLLLS. Krivulje su otprilike istog oblika uz malo veći nagib kod simulacije, odnosno vidljiva je mala kontinuirana razlika naprezanja tijekom cijelog ispitivanja do trenutka popuštanja.



Slika 39. Usporedba dijagrama rastezno naprezanje-istezanje u Abaqusu i Trapeziumu za ploču LSLLSL

Na Slici 39. prikazana je usporedba rezultata za ploču s rasporedom slojeva LSLLSL. Krivulje se tijekom cijelog ispitivanja vrlo dobro poklapaju, ni u jednom trenutku ne dolazi do velikih razlika između njih.



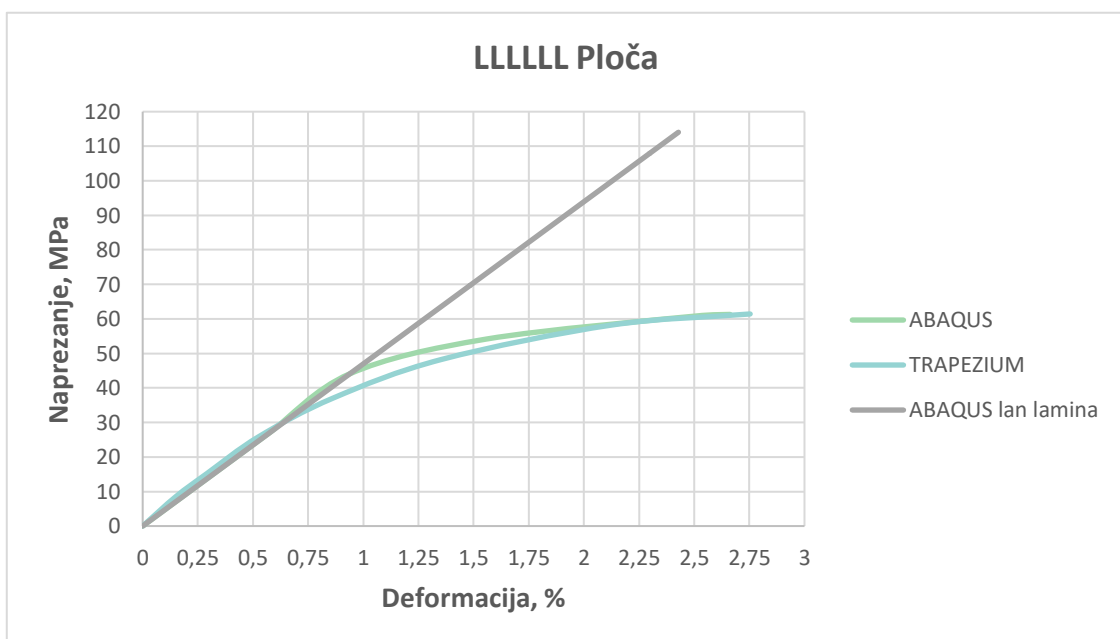
Slika 40. Usporedba dijagrama rastezno naprezanje-istezanje u Abaqusu i Trapeziumu za ploču LLSSLL

Na Slici 40. prikazana je usporedba rezultata za ploču s rasporedom slojeva LLSSLL. Također, kao i kod ploče LSLLSL, vidljivo je vrlo dobro poklapanje rezultata.



Slika 41. Usporedba dijagrama rastezno naprezanje-istezanje u Abaqusu i Trapeziumu za ploču SSSSSS

Na Slici 41. prikazana je usporedba rezultata za ploču s rasporedom slojeva SSSSSS. Kod ove ploče vidljive su gotovo iste vrijednosti naprezanja do deformacije od otprilike 0,95 %. Nakon toga, vidljiv je blagi pad naprezanja kod eksperimentalnog ispitivanja u odnosu na simulaciju.

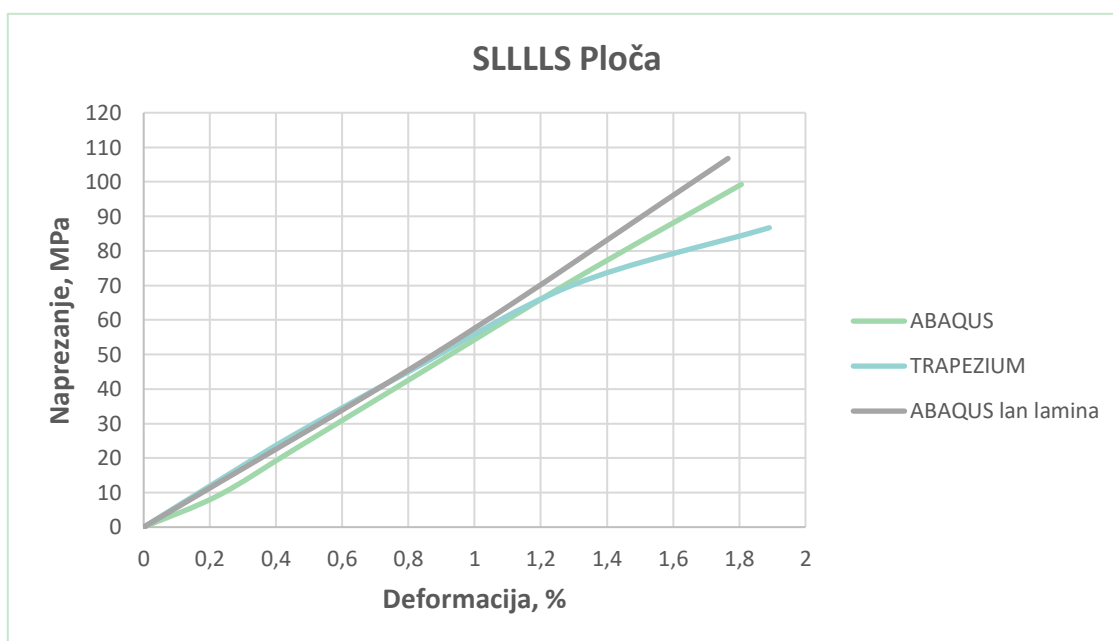


Slika 42. Usporedba dijagrama rastezno naprezanje-istezanje u Abaqusu i Trapeziumu za ploču LLLLLL

Na Slici 42. prikazana je usporedba rezultata za ploču s rasporedom slojeva LLLLLL. Vidljivo je vrlo dobro poklapanje rezultata duž cijelih krivulja. Blago povećanje napreznja kod simulacije javlja se u intervalu deformacije od otprilike 0,7 % do 2 %.

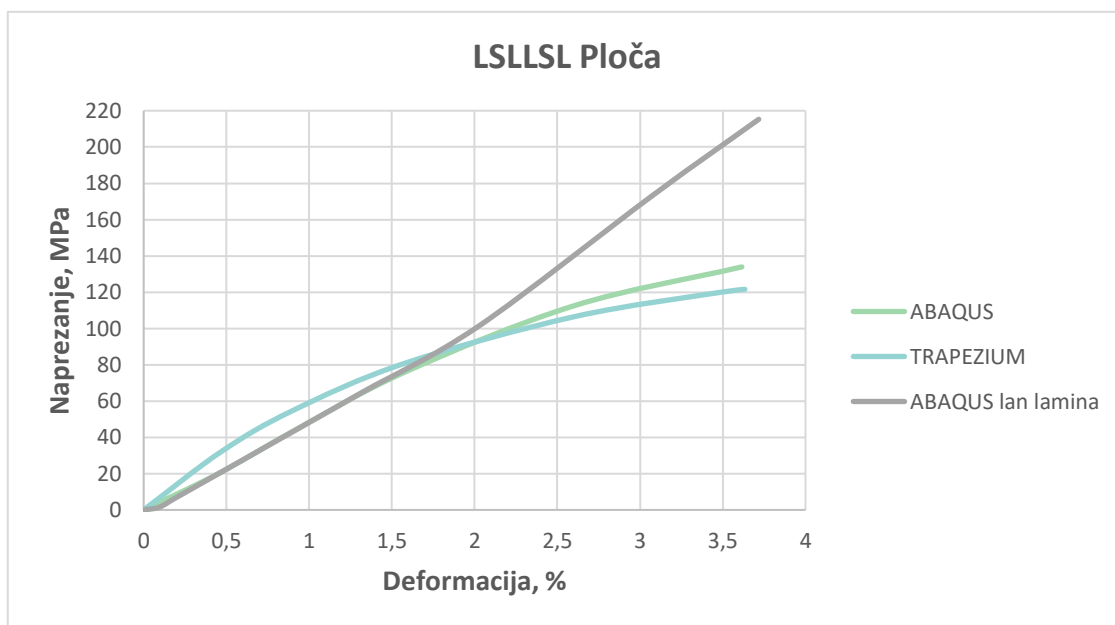
4.5. Usporedba numeričke simulacije i eksperimenta za savojno ispitivanje

Na Slikama 43. do 47. dana je usporedba rezultata za savojno ispitivanje dobivenih iz Abaqusa i pratećeg softvera kidalice, Trapeziuma. Oznaka ABAQUS lan lamina odnosi se na rezultate dobivene modeliranjem lana bez plastičnosti. U slučaju kompozita pripremljenih od samo lanenih vlakana te za hibridne kompozite, komentirano je poklapanje rezultata samo za modeliranje materijala kao izotropno elastičnog s plastičnim ponašanjem. Model s ortotropnim materijalom prikazan je kako bi se stekao dojam o potrebi modeliranja plastičnosti, ali nije dodatno komentiran zbog vidljive razlike u rezultatima.



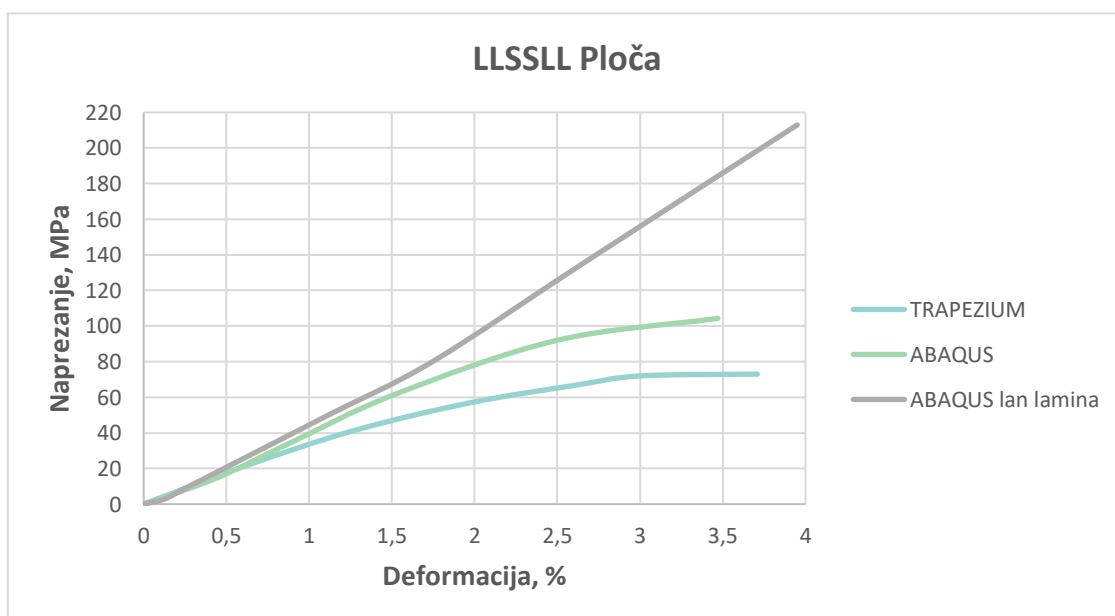
Slika 43. Usporedba dijagrama savojno napreznje-istezanje u Abaqusu i Trapeziumu za ploču SLLLLS

Na Slici 43. prikazana je usporedba rezultata za ploču s rasporedom slojeva SLLLLS. Vidljivo je kako duž većeg dijela krivulje dolazi do vrlo dobrog poklapanja rezultata dobivenih računalnom simulacijom i eksperimentalnim ispitivanjima. Malo veće odstupanje nastupa nakon deformacije od otprilike 1,3% gdje kod eksperimentalnog ispitivanja dolazi do manjeg pada napreznja do trenutka popuštanja, u odnosu na simulaciju.



Slika 44. Usporedba dijagrama savojno naprezanje-istezanje u Abaqusu i Trapeziumu za ploču LSLLSL

Na Slici 44. prikazana je usporedba rezultata za ploču s rasporedom slojeva LSLLSL. Kod ove ploče, ni u jednom trenutku nema većih odstupanja između simulacije i eksperimentalnog ispitivanja. Primjetno je jedino kako su do deformacije od otprilike 1,9 % napreznja dobivena eksperimentalnim ispitivanjem nešto viša u odnosu na ona dobivena simulacijom.



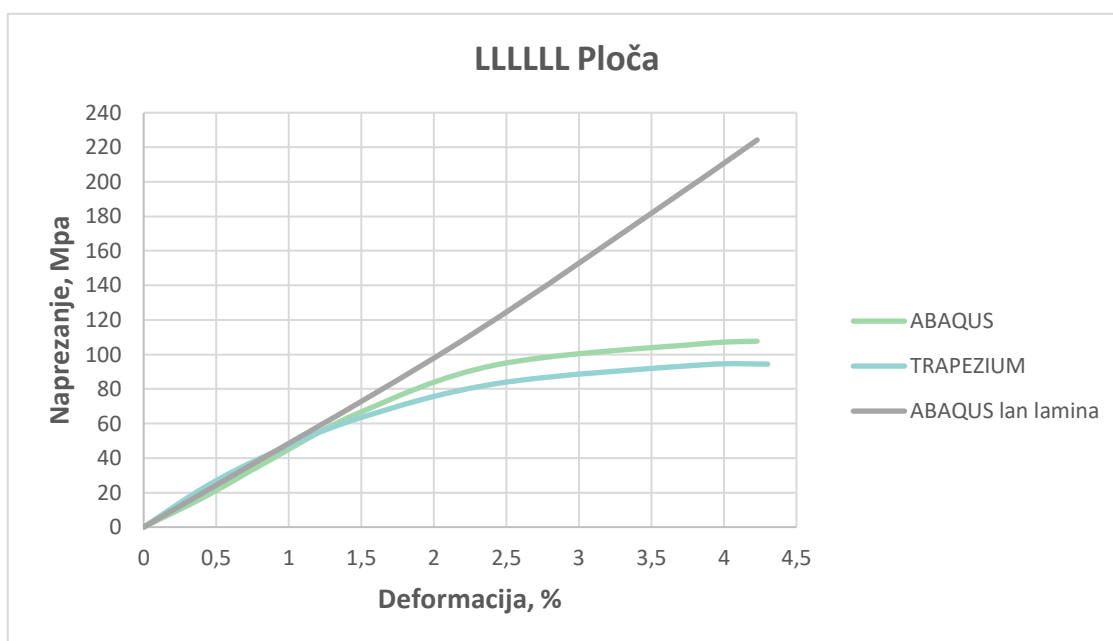
Slika 45. Usporedba dijagrama savojno naprezanje-istezanje u Abaqusu i Trapeziumu za ploču LLSLL

Na Slici 45. prikazana je usporedba rezultata za ploču s rasporedom slojeva LLSSLL. Duž cijele krivulje vidljiv je veći porast napreznja kod rezultata dobivenih simulacijom. U odnosu na ploče SLLLLS i LSLLSL, kod ove ploče dolazi do većih odstupanja, pa tako je ovdje i najveća razlika u napreznju u trenutku popuštanja, ta razlika otprilike iznosi 35 MPa.



Slika 46. Usporedba dijagrama savojno napreznja-istezanje u Abaqusu i Trapeziumu za ploču SSSSSS

Na Slici 46. prikazana je usporedba rezultata za ploču s rasporedom slojeva SSSSSS. Ovdje je također vidljiv veći porast napreznja kod simulacije, međutim ta razlika u porastu manja je nego kod prethodne LLSSLL ploče.



Slika 47. Usporedba dijagrama savojno naprezanje-istezanje u Abaqusu i Trapeziumu za ploču LLLLLL

Na Slici 47. prikazana je usporedba rezultata za ploču s rasporedom slojeva LLLLLL. Vidljivo je vrlo dobro poklapanje rezultata do deformacije od otprilike 1,6 %. Nakon toga dolazi do blago većeg porasta naprezanja kod simulacije.

Rezultati dobiveni modeliranjem epoksidne smole ojačane lanenim vlaknima kao linearno elastičan ortotropan materijal u stanju ravninskog naprezanja (lamina), dali su loša poklapanja kod rezultata i rasteznog i savojnog ispitivanja pa je napravljen novi model koji uzima u obzir plastičnost. Vidljivo je kako se ti rezultati puno bolje poklapaju s onima iz eksperimentalnih ispitivanja. S druge strane, kod epoksidne smole ojačane staklenim vlaknima nije bilo potrebno modelirati plastičnost jer je ona kod stakla slabo izražena. Niže čvrstoće stvarnih ploča mogu biti posljedica postupka ručnog laminiranja, velikog udjela šupljina te nižih stvarnih smičnih modula od onih preuzetih u literaturi.

5. Dodatne prilagodbe materijalnih modela na temelju literature

Lanena vlakna u kombinaciji s epoksidnom smolom korištena za izradu kompozita u ovom radu pokazala su plastično ponašanje vidljivo u dijagramima naprezanje-deformacija. Stoga je za numeričku simulaciju bilo potrebno prilagoditi materijalni model prema plastičnom ponašanju materijala. U slučaju staklenih vlakana i epoksidne smole bilo je dovoljno modelirati materijal kao ortotropan materijal u ravninskom stanju naprezanja kako bi se rezultati numeričke simulacije dobro poklapali s rezultatima eksperimentalnih ispitivanja. U ovom poglavlju istraženi su rezultati rasteznih ispitivanja provedenih u drugim literaturama s drugačijim tipom lanenih te istim tipom staklenih vlakana kako bi se provjerilo je li plastično ponašanje kod lanenih vlakana česta pojava ili je moguće modelirati ih kao ortotropan materijal u ravninskom stanju naprezanja kod drugačijih tipova vlakana. Također, rezultati ispitivanja dobiveni iz literature iskorišteni su kao dodatna validacija numeričkog modela. U nastavku je dan pregled dodatne literature i podataka korištenih za numeričku simulaciju.

5.1. Dodatna literatura

U literaturi [40] ispitivana su mehanička svojstva kompozita ojačanih različitim brojem slojeva lanenih vlakana. Za potrebe ovog rada preuzete su vrijednosti za kompozite s četiri, šest i sedam slojeva vlakana. Pri izradi kompozitnih ploča korištena je epoksidna smola InfuGreen 810 proizvođača Sicomin, Francuska, dok su lanena vlakna AmpliTEX 5042 proizvođača Bcomp, Švicarska. Lanena vlakna su u obliku atlas tkanja, pletena pod kutom od 90°. U nastavku je dana Tablica 11. s podacima o debljini ispitnih tijela te srednjim vrijednostima mehaničkih svojstava dobivenih rasteznim ispitivanjem. Za ostala mehanička svojstva potrebna za modeliranje materijala korištene su vrijednosti iz Tablice 6. te su ta svojstva korištena za sve ostale usporedbene simulacije. Vrijednost modula elastičnosti u smjeru 2 pretpostavljena je kao jednaka vrijednosti modula elastičnosti u smjeru 1.

Tablica 11. Podaci o srednjoj debljini ispitnih tijela te srednjim vrijednostima mehaničkih svojstava dobivenih rasteznim ispitivanjem [40]

	4 sloja	6 slojeva	7 slojeva
h_{sr} , mm	3,8	5,58	6,77
E_1 , MPa	7288,76	7469,06	7694,09
σ_m , MPa	119,41	124,13	125,75

U literaturi [41] ispitivana su rastezna svojstva kompozita ojačanih samo staklenim, samo lanenim te kombinacijom staklenih i lanenih vlakana. Staklena vlakna su Triaxal 1200 proizvođača Hebei iz Kine, dok su lanena vlakna istog tipa i proizvođača kao u literaturi [40]. Kao materijal matrice korištene su dvije smole – epoksidna smola InfuGreen 810 proizvođača Sicomin iz Francuske te poliesterska smola Synolite 1967-2-G proizvođača Baltazar kompozyty iz Poljske. Iz ovog rada preuzeti su rezultati rasteznog ispitivanja za kompozit ojačan sa šest slojeva lanenih vlakana u epoksidnoj matrici. U nastavku je dana Tablica 12. s podacima o debljini ispitnih tijela te srednjim vrijednostima mehaničkih svojstava dobivenih rasteznim ispitivanjem. Vrijednost modula elastičnosti u smjeru 2 pretpostavljena je kao jednaka vrijednosti modula elastičnosti u smjeru 1.

Tablica 12. Podaci o srednjoj debljini ispitnih tijela te srednjim vrijednostima mehaničkih svojstava dobivenih rasteznim ispitivanjem [41]

	6 slojeva
h_{sr} , mm	6,02
E_1 , MPa	7907,14
σ_m , MPa	117,74

U literaturi [42] ispitivana su rastezna i goriva svojstva hibridnih kompozita s epoksidnom matricom koji se sastoje od dva sloja staklenih vlakana u vanjskim slojevima te dva sloja lanenih vlakana u unutrašnjosti. Rezultati ispitivanja uspoređivani su s rezultatima kompozita s epoksidnom matricom ojačanih s četiri sloja staklenih vlakana. Vlakna korištena u ovom radu istog su tipa i proizvođača kao u literaturi [41]. Triaxial staklena vlakna sastoje se od povezanih slojeva pod kutevima od $\pm 45^\circ$ sa slojevima pod kutem od 0° stupnjeva. Iz ovog rada preuzeti su rezultati rasteznog ispitivanja za kompozit ojačan sa četiri sloja staklenih vlakana. U nastavku je dana Tablica 13. s podacima o debljini ispitnih tijela te srednjim vrijednostima mehaničkih svojstava dobivenih rasteznim ispitivanjem. Vrijednost modula elastičnosti u smjeru 2 pretpostavljena je kao jednaka vrijednosti modula elastičnosti u smjeru 1.

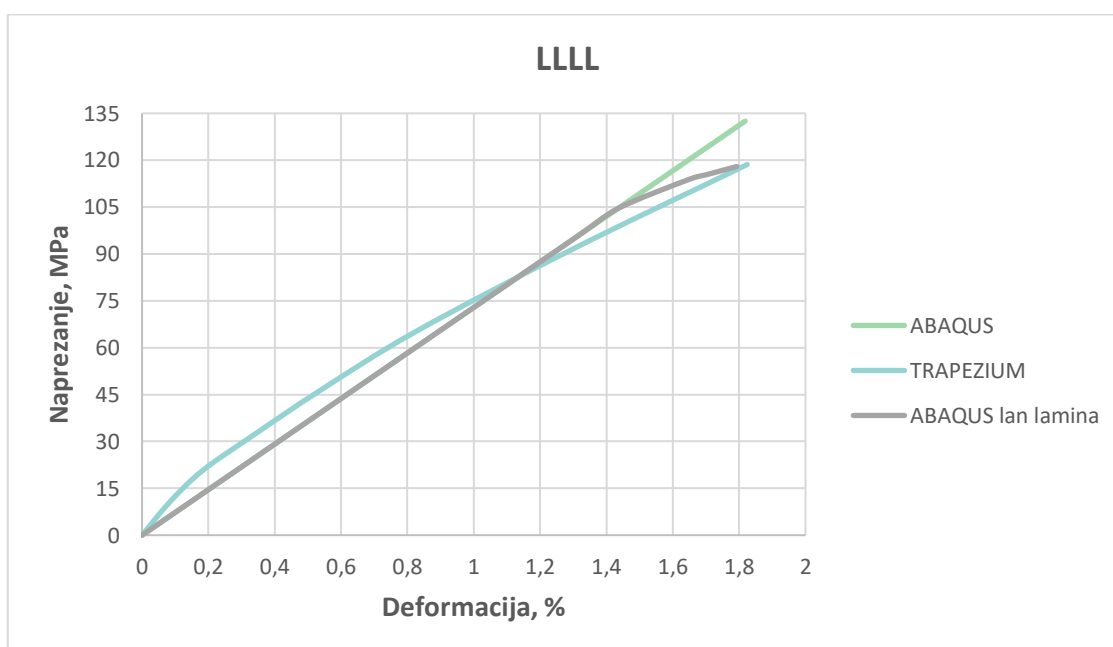
Tablica 13. Podaci o srednjoj debljini ispitnih tijela te srednjim vrijednostima mehaničkih svojstava dobivenih rasteznim ispitivanjem [42]

	4 sloja
h_{sr} , mm	2,75
E_1 , MPa	11192,77
σ_m , MPa	233,97

5.2. Rezultati simulacija rasteznog ispitivanja na temelju dodatnih ispitivanja

Simulacija je za sve slučajeve provedena uz dva materijalna modela – zelena krivulja predstavlja modeliranje ortotropnog materijala u stanju ravninskog napreznja dok siva krivulja predstavlja model plastičnosti s izotropnim očvrnućem. Plava krivulja predstavlja rezultate dobivene eksperimentalnim ispitivanjem.

Na Slici 48. prikazani su rezultati simulacije za četiri sloja lanenih vlakana iz literature [40].

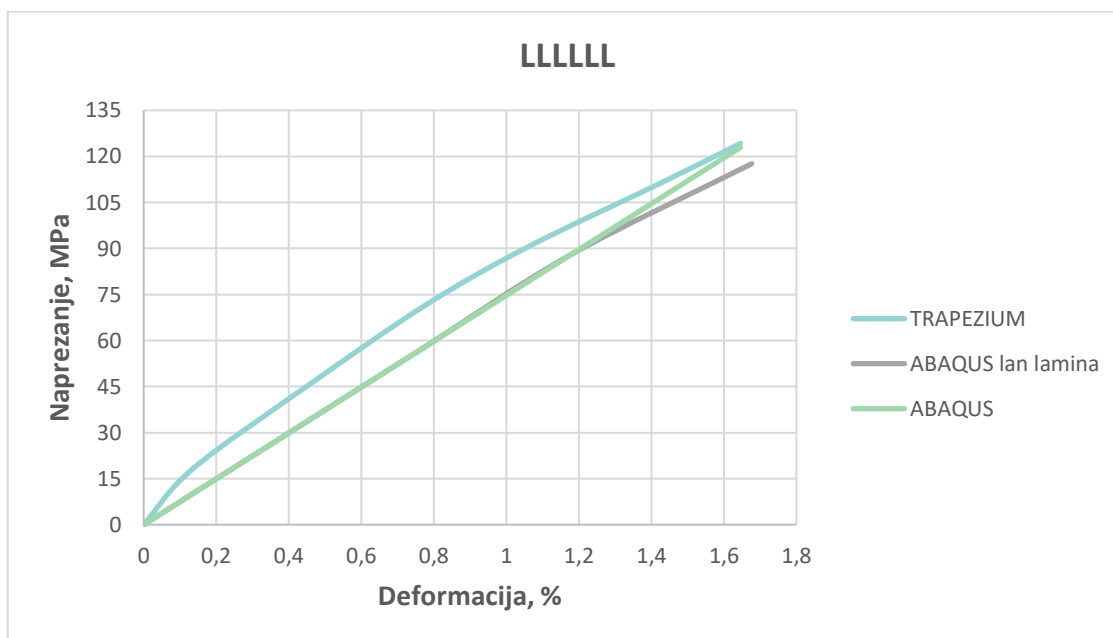


Slika 48. Usporedba dijagrama rastezno napreznje-istezanje u Abaqusu i Trapeziumu za ploču s četiri sloja lanenih vlakana iz literature [40]

U slučaju modeliranja materijala kao ortotropnog u ravninskom stanju napreznja rastezna čvrstoća se razlikuje za 15 MPa, dok se u slučaju modeliranja plastičnosti razlikuju za 1 MPa. Vidljivo je dobro poklapanje rezultata duž cijelih krivulja s tim da rezultati numeričkih

simulacija imaju nešto manji nagib krivulja na početku, dok krivulja eksperimentalnog ispitivanja poprima blagi pad u odnosu na numeričke simulacije, nakon deformacije od 1,1 %.

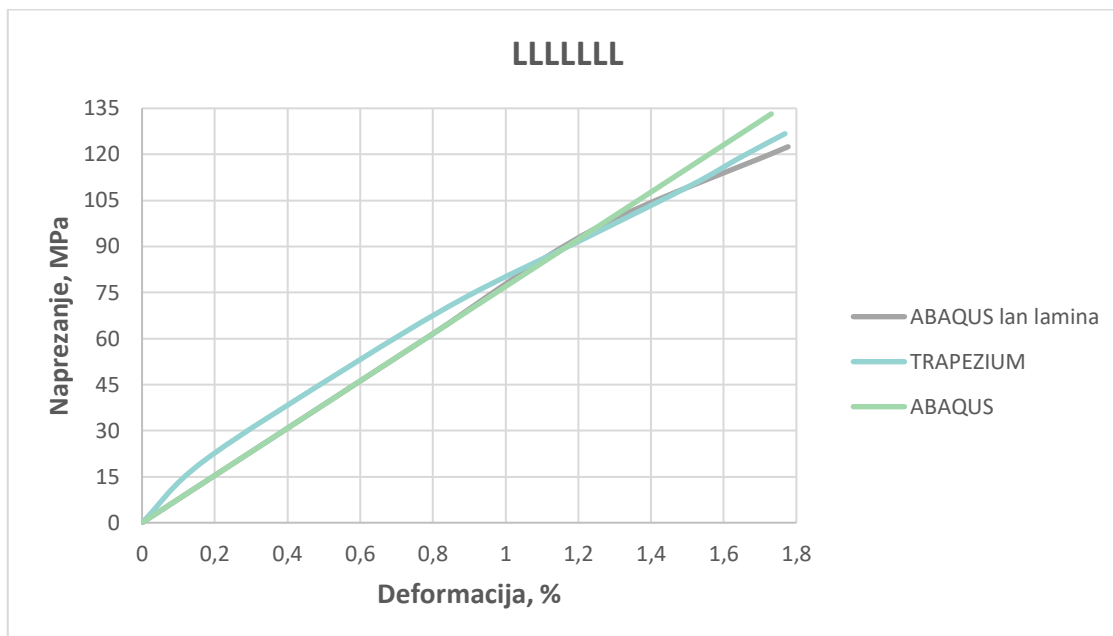
Na Slici 49. prikazana je usporedba rezultata za kompozit ojačan sa šest slojeva lanenih vlakana preuzetih iz literature [40] s rezultatima simulacije.



Slika 49. Usporedba dijagrama rastezno napreznje-istezanje u Abaqusu i Trapeziumu za ploču sa šest slojeva lanenih vlakana iz literature [39]

U slučaju modeliranja materijala kao ortotropnog u ravninskom stanju napreznja rastezna čvrstoća se razlikuje za 1 MPa, dok se u slučaju modeliranja plastičnosti razlikuju za 6 MPa. Krivulje su otprilike istog oblika uz malo veći nagib kod eksperimentalnog ispitivanja, odnosno vidljiva je mala kontinuirana razlika napreznja tijekom cijelog ispitivanja do trenutka popuštanja.

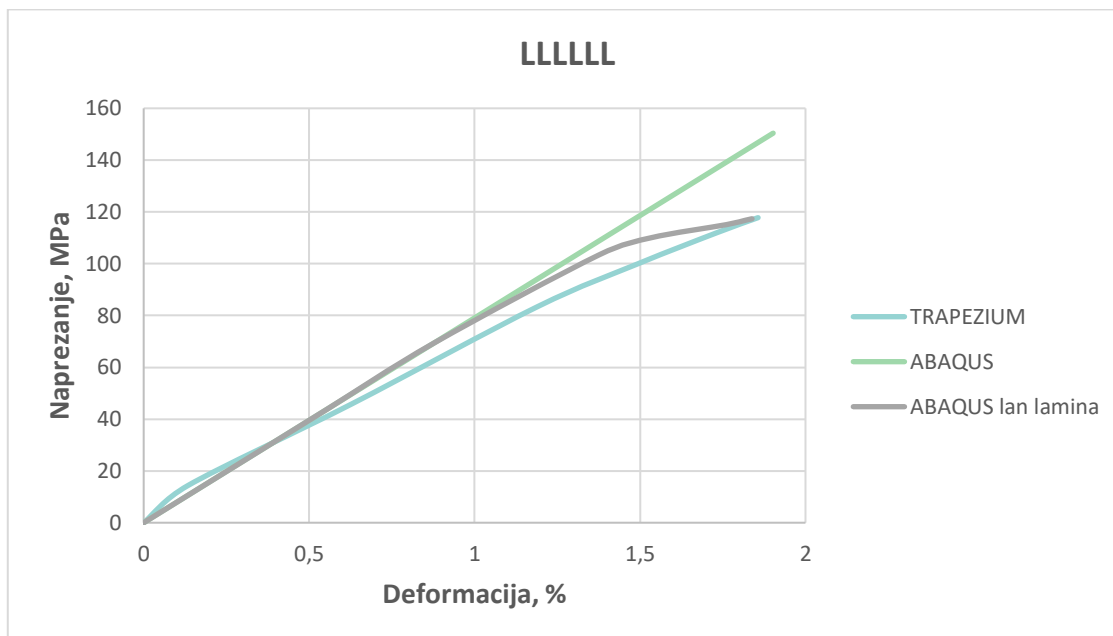
Na Slici 50. prikazana je usporedba rezultata za kompozit ojačan sa sedam slojeva lanenih vlakana preuzetih iz literature [40] s rezultatima simulacije.



Slika 50. Usporedba dijagrama rastezno naprezanje-istezanje u Abaqusu i Trapeziumu za ploču sa sedam slojeva lanenih vlakana iz literature [39]

U slučaju modeliranja materijala kao ortotropnog u ravninskom stanju naprezanja rastezna čvrstoća se razlikuje za 7 MPa, dok se u slučaju modeliranja plastičnosti razlikuju za 4 MPa. Vidljivo je dobro poklapanje rezultata duž cijelih krivulja.

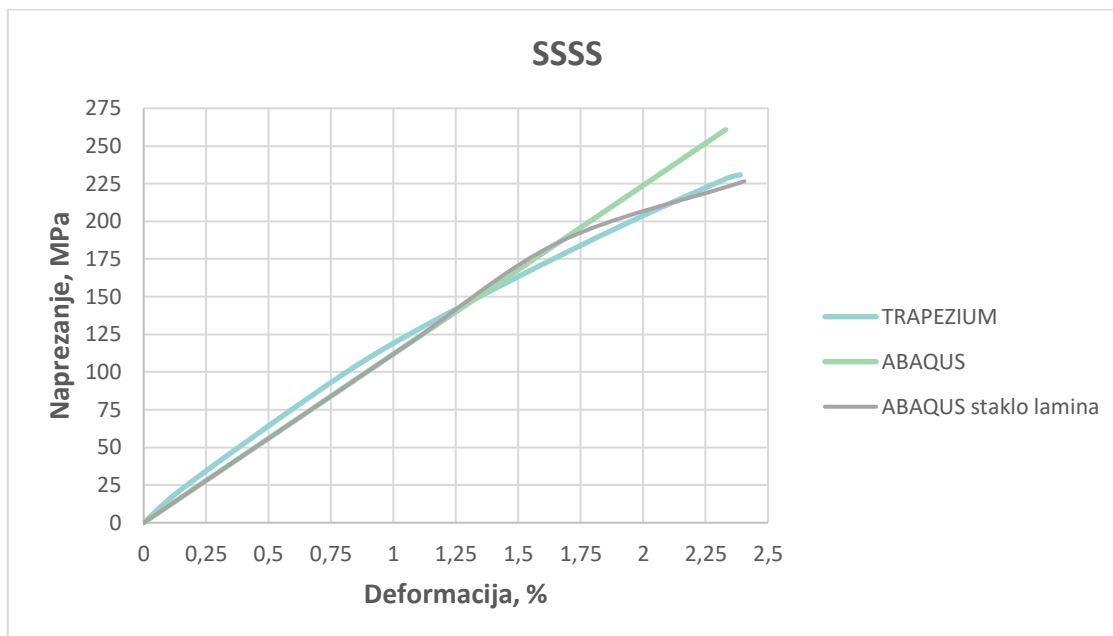
Na Slici 51. prikazana je usporedba rezultata za kompozit ojačan sa šest slojeva lanenih vlakana preuzetih iz literature [41] s rezultatima simulacije.



Slika 51. Usporedba dijagrama rastezno napreznje-istezanje u Abaqusu i Trapeziumu za ploču sa šest slojeva lanenih vlakana iz literature [41]

U slučaju modeliranja materijala kao ortotropnog u ravninskom stanju napreznja rastezna čvrstoća se razlikuje za 33 MPa, dok se u slučaju modeliranja plastičnosti poklapaju na istoj vrijednosti. Vidljivo je dobro poklapanje rezultata duž cijelih krivulja uz malo veći nagib i izraženiju plastičnu zonu u slučaju numeričke simulacije.

Na Slici 52. prikazana je usporedba rezultata za kompozit ojačan s četiri sloja staklenih vlakana preuzetih iz literature [42] s rezultatima simulacije.



Slika 52. Usporedba dijagrama rastezno naprezanje-istezanje u Abaqusu i Trapeziumu za ploču s četiri sloja staklenih vlakana iz literature [41]

U slučaju modeliranja materijala kao ortotropnog u ravninskom stanju naprezanja rastezna čvrstoća se razlikuje za 31 MPa, dok se u slučaju modeliranja plastičnosti razlikuju za 3 MPa. Kod ove ploče vidljive su gotovo iste vrijednosti naprezanja do deformacije od otprilike 1,5 %. Nakon toga, vidljiv je blagi pad naprezanja kod eksperimentalnog ispitivanja u odnosu na numerički model s ortotropnim materijalom, dok je za slučaj modeliranja izotropnog materijala s plastičnim ponašanjem poklapanje rezultata duž cijele krivulje vrlo dobro.

6. ZAKLJUČAK

Ponašanje pripremljenih kompozita pri ispitivanju mehaničkih svojstava nije potpuno u skladu s očekivanjima, premda odstupanja od očekivanja nisu velika. Iznimka je čvrstoća hibrida sa staklenim vlaknima u vanjskim slojevima pri savojnom opterećenju. Suprotno očekivanjima, ovaj kompozit je imao 35 % nižu čvrstoću od kompozita sa redosljedom slaganja vlakana LSLLSL. S druge strane, kao što je predviđeno hipotezom, pri savijanju najlošija kombinacija je kompozit sa staklenim vlaknima postavljenim u sredini. Zanimljivo je da se upravo ova kombinacija kod rasteznog opterećenja pokazala najboljom od svih hibrida.

Pri rasteznom opterećenju, očekivano, kompozit ojačan staklom ima najviši modul i čvrstoću, dok je kompozit ojačan samo lanenim vlaknima čak 84 % istežljiviji. Moduli hibrida pri rasteznom opterećenju se ne razlikuju značajno, no čvrstoća hibrida sa staklenim vlaknima u sredini najviša je od svih hibrida.

Čvrstoća kompozita sa staklenim vlaknima u vanjskim slojevima najniža je od svih kompozita u oba slučaja, i u rasteznom i u savojnom eksperimentu. Kompoziti su izrađeni ručnim polaganjem te je moguće da je došlo do nekih nepravilnosti poput slabije impregnacije staklenih vlakana u površinskim slojevima pri izradi ove ploče.

Numeričke simulacije pokazale su dobra poklapanja sa rezultatima eksperimentalnih ispitivanja. Materijalni model za kompozitne materijale koji je dostupan u Abaqus-u (ortotropan materijal u stanju ravninskog naprezanja uz Hashin-ov model inicijacije i propagacije oštećenja) ne može se koristiti za modeliranje slojeva ojačanih lanenim vlaknima zbog izraženog nelinearnog ponašanja. Uvedena je aproksimacija nelinearnog dijela ponašanja materijala primjenom izotropno elastičnog materijala uz model plastičnog ponašanja uz izotropno očvršnuće, čime su postignuti zadovoljavajući rezultati.

Radi provjere numeričkih modela provedene su i dodatne simulacije pomoću podataka iz literature. Ustanovljeno je kako se kod većine modela bolja poklapanja s rezultatima eksperimentalnih ispitivanja ostvaruju uz modeliranje materijala kao izotropno elastičnog uz model plastičnog ponašanja uz izotropno očvršnuće. No, s obzirom na to da je riječ o kompozitnim materijalima, rasipanja u rezultatima su očekivana i prihvatljiva. Naime, do rasipanja u rezultatima kod eksperimentalnih ispitivanja kompozita pripremljenih od istog tipa matrice i ojačala, uz jednaku orijentaciju ojačala, može doći uslijed korištenja različitih metoda izrade kompozita, ali i pri korištenju iste metode jer se u kompozitu mogu javiti nesavršenosti poput pukotina ili zaostalih mjehurića zraka, a može doći i do nedovoljne impregnacije vlakana

matricom. Stoga, u nekim slučajevima korištenja modeliranja materijala kao ortotropnog moguće je prihvatiti rezultate, dok je u ostalim slučajevima potrebno koristiti modeliranje plastičnog ponašanja materijala. Za dodatno poboljšanje rezultata simulacije pogodno bi bilo zamijeniti sve pretpostavljene vrijednosti mehaničkih svojstava s realnim vrijednostima dobivenim eksperimentalnim ispitivanjima.

Numerički modeli predstavljeni u ovom radu pokazuju zadovoljavajuća poklapanja s eksperimentalnim rezultatima te se mogu koristiti za simulacije jednostavnijih opterećenja uz postavljanje odgovarajućih faktora sigurnosti. Kao sljedeći korak ovog istraživanja, za slojeve ojačane lanenim vlaknima, trebalo bi u Abaqus/Standard implementirati ortotropan viskoelastičan ili viskoplastičan materijalan model primjenom korisničkog potprograma za modeliranje konstitutivnog ponašanja, s ciljem postizanja pouzdanijih rezultata numeričkog modela kod višeosnih ispitivanja.

LITERATURA

- [1] Singh J, Kumar M, Kumar S, Mohapatra SK. Properties of Glass-Fiber Hybrid Composites: A Review. *Polym Plast Technol Eng.* 2017.;56(5):455–469.
- [2] Jawaid M, Hamdan A, Hameed Sultan MT. *Structural Health Monitoring System for Synthetic, Hybrid and Natural Fiber Composites.* Springer Singapore; 2021. V–VI.
- [3] Gangil B, Ranakoti L, Verma S, Singh T, Kumar S. *Natural and Synthetic Fibers for Hybrid Composites.* Hybrid Fiber Composites. John Wiley & Sons, Ltd; 2020.; 1–15
- [4] Ramam RS, Padal KTB. Effect of fiber orientation on the mechanical properties of natural fiber epoxy reinforced composites of Flax, Hemp, and Kenaf. *International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration.*
- [5] Jawaid M, Abdul Khalil HPS. Cellulosic/synthetic fibre reinforced polymer hybrid composites: A review. *Carbohydr Polym.* 2011.;86(1):1–18
- [6] Guide to composites. Gurit; <https://www.gurit.com/wp-content/uploads/2022/12/guide-to-composites-1.pdf> [08.03.2024.]
- [7] Jamir MRM, Majid MSA, Khasri A. Natural lightweight hybrid composites for aircraft structural applications. U: *Sustainable Composites for Aerospace Applications.* Elsevier; 2018.; 155–170.
- [8] Sharma S. *Composite Materials; Mechanics, Manufacturing and Modeling.* 1. izd. Boca Raton: CRC Press; 2021.; 7–85
- [9] Dong C. Review of natural fibre-reinforced hybrid composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites.* 2018.;37(5):331–348
- [10] Elmessiry M. *Natural Fiber Textile Composite Engineering.* 1st izd. Natural Fiber Textile Composite Engineering. Apple Academic Press Inc.; 2017.; 7–88
- [11] AL-Oqla FM, Salit MS. *Natural fiber composites.* U: *Materials Selection for Natural Fiber Composites.* Elsevier; 2017.: 23–48
- [12] Pickering KL, Efendy MGA, Le TM. A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. *Compos Part A Appl Sci Manuf.* 2016.;83:98–112.
- [13] Ku H, Wang H, Pattarachaiyakooop N, Trada M. A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites. *Compos B Eng.* 2011.;42(4):856–873.
- [14] Ahmad R, Hamid R, Osman SA. Physical and chemical modifications of plant fibres for reinforcement in cementitious composites. *Advances in Civil Engineering.* 2019.

- [15] John MJ, Thomas S. Biofibres and biocomposites. *Carbohydr Polym.* 2008.; 71(3):343–364
- [16] Jagadeesh P, Puttegowda M, Mavinkere Rangappa S, Siengchin S. A review on extraction, chemical treatment, characterization of natural fibers and its composites for potential applications. *Polym Compos.* 2021.;42(12):6239–6264
- [17] Yahaya R, Sapuan SM, Jawaid M, Leman Z, Zainudin ES. Effect of layering sequence and chemical treatment on the mechanical properties of woven kenaf-aramid hybrid laminated composites. *Mater Des.* 2015.;67:173–179
- [18] Muthuraja A, Rajak DK. Tribological Properties of Natural Fiber-Reinforced Polymer Composites. U: *Natural and Synthetic Fiber Reinforced Composites.* John Wiley & Sons, Ltd; 2022.; 81–91.
- [19] Santulli C, Janssen M, Jeronimidis G. Partial replacement of E-glass fibers with flax fibers in composites and effect on falling weight impact performance. *J Mater Sci.* 2005.;40(13):3581–3585.
- [20] Venkata Subba Reddy E, Varada Rajulu A, Hemachandra Reddy K, Ramachandra Reddy G. Chemical resistance and tensile properties of glass and bamboo fibers reinforced polyester hybrid composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites.* 2010.; 29(14):2119–2123.
- [21] Samal SK, Mohanty S, Nayak SK. Banana/glass fiber-reinforced polypropylene hybrid composites: Fabrication and performance evaluation. *Polymer - Plastics Technology and Engineering.* 2009.; 48(4):397–414.
- [22] Zhang Y, Li Y, Ma H, Yu T. Tensile and interfacial properties of unidirectional flax/glass fiber reinforced hybrid composites. *Compos Sci Technol.* 2013.; 88:172–177.
- [23] AlMaadeed MA, Kahraman R, Noorunnisa Khanam P, Madi N. Date palm wood flour/glass fibre reinforced hybrid composites of recycled polypropylene: Mechanical and thermal properties. *Mater Des.* 2012.; 42:289–294.
- [24] Raghavendra Rao H, Varada Rajulu A, Ramachandra Reddy G, Hemachandra Reddy K. Flexural and compressive properties of bamboo and glass fiber-reinforced epoxy hybrid composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites.* 2010.; 29(10):1446–1450.
- [25] Valente M, Sarasini F, Marra F, Tirillò J, Pulci G. Hybrid recycled glass fiber/wood flour thermoplastic composites: Manufacturing and mechanical characterization. *Compos Part A Appl Sci Manuf.* 2011.; 42(6):649–657.

- [26] Almeida Júnior JHS, Ornaghi Júnior HL, Amico SC, Amado FDR. Study of hybrid intralaminar carbon/glass composites. *Mater Des.* 2012.; 42:111–117.
- [27] Reddy MVK, Lakshmi RVS, Pragathi Y, Devaraj P, Naresh N. Evaluation of mechanical properties: Influence of glass fiber on banana fiber reinforced with epoxy composite. *Materials Today: Proceedings.* Elsevier Ltd; 2020.;1305–1312.
- [28] Blanchard JMFA, Sobey AJ. Comparative design of E-glass and flax structures based on reliability. *Compos Struct.* 2019.; 225:111037.
- [29] Zhu J, Zhu H, Njuguna J, Abhyankar H. Recent development of flax fibres and their reinforced composites based on different polymeric matrices. *Materials.* 2013.; 6(11):5171–5198.
- [30] Khalid MY, Al Rashid A, Arif ZU, Sheikh MF, Arshad H, Nasir MA. Tensile strength evaluation of glass/jute fibers reinforced composites: An experimental and numerical approach. *Results in Engineering.* 2021.;10.
- [31] Mostafa NH. Tensile and fatigue properties of Jute-Glass hybrid fibre reinforced epoxy composites. *Mater Res Express.* 2019.;6(8).
- [32] Sabău E, Trif A, Miron-Borzan C-Ș, Popescu A. Numerical Simulation of Flexural Behaviour of Glass Fiber Reinforced Polymer Composites. *Academic Journal of Manufacturing Engineering.* 2021.;19(1):52.
- [33] Puttegowda M, Thyavihalli Girijappa YG, Mavinkere Rangappa S, Parameswaranpillai J, Siengchin S. Effect of Process Engineering on the Performance of Hybrid Fiber Composites. *U: Hybrid Fiber Composites.* John Wiley & Sons, Ltd; 2020.;17–40.
- [34] Udipi SR, Lester Raj Rodrigues L. Detecting Safety Zone Drill Process Parameters for Uncoated HSS Twist Drill in Machining GFRP Composites by Integrating Wear Rate and Wear Transition Mapping. *Indian Journal of Materials Science.* 2016.;2016:1–8.
- [35] EN ISO 527-4:2012: Plastics-Determination of tensile properties. 2012.
- [36] EN ISO 14125:1998: Fibre-reinforced plastic composites-Determination of flexural properties. 2003.
- [37] Shinde D, Kimbro E, Kelkar A. Mechanical properties of woven fiberglass Composite interleaved with glass nanofibers. 19th international conference on composite materials ICCM19. 2013.
- [38] El Sawi I, Bougherara H, Zitoune R, Fawaz Z. Influence of the manufacturing process on the mechanical properties of flax/epoxy composites. *J Biobased Mater Bioenergy.* 2014.;8(1):69–76.

-
- [39] Xu D, Cerbu C, Wang H, Rosca IC. Analysis of the hybrid composite materials reinforced with natural fibers considering digital image correlation (DIC) measurements. *Mechanics of Materials*. 2019.;135:46–56.
- [40] Pintur K. Mehanička svojstva kompozita ojačanih različitim brojem slojeva lanenih vlakana i njihova primjena u brodogradnji. Zagreb; 2022.
- [41] Dundović P. Rastezna svojstva polimernih kompozita ojačanih lanenim vlaknima. Zagreb; 2022.
- [42] Grgurić I. Rastezna i goriva svojstva hibridnih kompozita s polimernom matricom. Zagreb; 2023.