

Simulacija kompozitnih konstrukcija u uvjetima udarnog opterećenja

Varenina, Helena

Master's thesis / Diplomski rad

2020

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:235:501003>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-21**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Helena Varenina

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Darko Ivančević, mag. ing. aeroing.

Student:

Helena Varenina

Zagreb, 2020.

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

Zahvaljujem se svom mentoru doc. dr. sc. Darku Ivančeviću na pristupačnosti, strpljenju, konstruktivnim kritikama i stručnim savjetima tijekom studija, a pogotovo tijekom izrade ovog rada.

Zahvaljujem se tvrtki Rimac Automobili d.o.o. na ideji i ustupljenim materijalima koji su rezultirali ovim radom. Također, veliko hvala kolegama iz tvrtke koji su me neumorno ohrabivali, svojim znanjima i iskustvima obogatili te motivirali u daljnjem profesionalnom razvoju.

Posebno se zahvaljujem svojem ocu, sestri i braći, ali i cijeloj obitelji na strpljenju i podršci tijekom čitavog obrazovanja, a posebno u trenucima kada je to bilo najpotrebnije i kada se cilj činio nedostižnim.

Također, hvala mojim osebujnim prijateljima koji su uvijek pronalazili najbolje i najšaljivije načine za premošćivanje svih studentskih, ali i životnih prepreka.

I na kraju, neizmerno hvala mojoj majci koja me uvijek poticala na ustrajnost i koja me naučila da se iskreno uživaju samo plodovi marljivog rada.

Helena Varenina



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Helena Varenina** Mat. br.: 0035199297

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Simulacija kompozitnih konstrukcija u uvjetima udarnog opterećenja**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Simulation of composite structures in impact loading conditions**

Opis zadatka:

Kompozitni materijali se zbog svojih dobrih specifičnih mehaničkih svojstava sve češće koriste za izradu komponenata automobila visokih performansi. Jedan od problema primjene kompozitnih materijala u tu svrhu je ponašanje konstrukcije pri udarnom opterećenju. Pri velikim brzinama deformacije se mehanički odziv kompozita znatno razlikuje u odnosu na odziv u statičkim uvjetima, a taj je utjecaj najviše izražen kod mehaničkih svojstava koja su određena ponašanjem matrice. U diplomskom radu potrebno je simulirati ponašanje udarno opterećenih kompozitnih automobilskih komponenata primjenom dva različita programa za numerički proračun čvrstoće.

U okviru diplomskog rada potrebno je:

- opisati modele inicijacije i propagacije oštećenja koji su ugrađeni u programe za numerički proračun čvrstoće *Abaqus*[®] i *HyperWorks*[®],
- korištenjem navedenih programa, simulirati udar velikom brzinom u dva različita profila (otvoreni i zatvoreni) pri različitim početnim brzinama udarača,
- međusobno usporediti numeričke rezultate dobivene korištenjem dva različita numerička programa,
- validaciju numeričke metodologije provesti usporedbom s dostupnim eksperimentalnim rezultatima,
- odrediti utjecaj rasporeda slojeva na iznos apsorbirane energije,
- u zaključku rada kritički se osvrnuti na rezultate dobivene korištenjem različitih numeričkih metodologija.

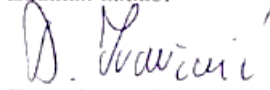
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
16. siječnja 2020.

Datum predaje rada:
19. ožujka 2020.

Predviđeni datum obrane:
23. – 27.3.2020.

Zadatak zadao:


Doc. dr. sc. Darko Ivančević

Predsjednica Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD.....	1
2. KOMPOZITNI MATERIJALI.....	4
2.1. Prednosti kompozitnih materijala	5
2.2. Nedostatci kompozitnih materijala	6
2.3. Testiranje kompozitnih materijala na udarna oštećenja [9]	7
2.4. Načini popuštanja kompozita.....	10
2.5. Kriteriji popuštanja	10
3. MATERIJALNI MODEL.....	13
3.1. <i>HyperWorks</i>	13
3.1.1. Tsai-Wu kriterij [6]	13
3.1.2. Materijalna kartica u <i>HyperWorksu</i> [17]	15
3.2. <i>Abaqus</i>	22
3.2.1. Hashinov kriterij [18].....	22
3.2.2. Materijalna kartica u <i>Abaqusu</i>	26
4. NUMERIČKO MODELIRANJE UDARNOG OPTEREĆENJA I VALIDACIJA S EKSPERIMENTALNIM REZULTATIMA	33
4.1. Apsorber „otvorenog“ profila	33
4.2. Apsorber „zatvorenog“ profila.....	35
4.3. Usporedba rezultata i odabir odgovarajućeg numeričkog modela.....	36
4.3.1. Apsorber „otvorenog“ profila	36
4.3.2. Apsorber „zatvorenog“ profila.....	40
5. REZULTATI	42
5.1. Udar pri različitim početnim brzinama udarača na apsorber „otvorenog“ profila.....	42
5.2. Udar pri različitim početnim brzinama udarača na apsorber „zatvorenog“ profila ...	48
5.3. Spособnost apsorpiranja energije uz promijenjen raspored slojeva	51
6. ZAKLJUČAK.....	54
LITERATURA.....	56
PRILOZI.....	58

POPIS SLIKA

Slika 1.	1953 <i>Chevrolet Corvette Roadster</i> [1]	1
Slika 2.	<i>McLarenovi</i> okviri od kompozita s ugljičnim vlaknima [2].....	2
Slika 3.	<i>C_Two</i> tvrtke Rimac Automobili d.o.o. [3].....	2
Slika 4.	Kompozitna ojačala [6]	5
Slika 5.	Utjecaj usmjerenja vlakana s obzirom na naprezanje za Ti-leguru ojačanu vlaknima bora [5]	5
Slika 6.	<i>Charpy</i> test [10].....	7
Slika 7.	Aparatura za ispitivanje čistog vlačnog naprezanja [9].....	8
Slika 8.	Oprema za tlačni test nakon udara (CAI) [11]	9
Slika 9.	Načini popuštanja jednosmjernih kompozita [13].....	10
Slika 10.	Definicija globalnog i materijalnog koordinatnog sustava [14]	11
Slika 11.	Krivulje popuštanja uslijed posmičnog i normalnog naprezanja u transverzalnom smjeru za jednosmjerni karbon/epoksi kompozit [15]	12
Slika 12.	Modeliranje na razini sloja [16]	13
Slika 13.	Površina popuštanja prema <i>Tsai-Wu</i> kriteriju [6].....	15
Slika 14.	Inicijacija i propagacija oštećenja [17].....	19
Slika 15.	Test na jednom elementu	20
Slika 16.	Dijagram naprezanje-deformacija za vlak i tlak.....	21
Slika 17.	Dijagram naprezanje-deformacija za smik.....	21
Slika 18.	Utjecaj brzine deformacije na σ - ε dijagram	22
Slika 19.	Dijagram ovisnosti ekvivalentnog naprezanja i ekvivalentnog pomaka [18]	24
Slika 20.	Usporedba σ - u krivulja dobivenih u <i>HyperWorksu</i> i <i>Abaqusu</i>	28
Slika 21.	Usporedba σ - ε dijagrama dobivenih u <i>HyperWorksu</i> i <i>Abaqusu</i>	29
Slika 22.	Usporedba σ - u krivulja dobivenih u <i>Abaqusu</i> za tkani i jednosmjerni kompozit .	30
Slika 23.	Usporedba σ - ε dijagrama dobivenih u <i>Abaqusu</i> za jednosmjerni (UD) i tkani (W) kompozit.....	31
Slika 24.	Usporedba σ - u krivulja dobivenih u <i>Abaqusu</i> i <i>HyperWorksu</i> za različitu veličinu elementa.....	32
Slika 25.	Apsorber „otvorenog“ profila s dimenzijama u mm	33
Slika 26.	Numerički model „otvorenog“ apsorbera u <i>HyperWorksu</i>	34
Slika 27.	Apsorber „zatvorenog“ profila s dimenzijama u mm.....	35
Slika 28.	Numerički model „zatvorenog“ apsorbera u <i>HyperWorksu</i>	36
Slika 29.	Krivulje intruzije udarača dobivene eksperimentalnim putem i korištenjem <i>HyperWorksa</i>	37
Slika 30.	Krivulje intruzije udarača dobivene eksperimentalnim putem i korištenjem <i>Abaqusa</i>	38
Slika 31.	Krivulje intruzije udarača za tkani (W) i jednosmjerni (UD) kompozit dobivene korištenjem <i>Abaqusa</i>	38
Slika 32.	Krivulje intruzije udarača dobivene eksperimentalnim putem i s novim vrijednostima energije utrošene na popuštanje korištenjem <i>Abaqusa</i>	39
Slika 33.	Krivulje intruzije udarača za tkani (W) i jednosmjerni (UD) kompozit dobivene korištenjem <i>Abaqusa</i> s reduciranim vrijednostima energije utrošene na popuštanje	40
Slika 34.	Krivulje intruzije udarača dobivene eksperimentalnim putem i korištenjem <i>HyperWorksa</i>	40

Slika 35.	Sinus uzorak „zatvorenog“ profila	41
Slika 36.	Krivulje intruzije udarača u apsorber „otvorenog“ profila pri $v_0 = 7 \text{ ms}^{-1}$	42
Slika 37.	Krivulje brzine udarača uslijed udara u apsorber „otvorenog“ profila pri $v_0 = 7 \text{ ms}^{-1}$	42
Slika 38.	Primjena drugog <i>Newtonova</i> zakona za izračun udarne sile	43
Slika 39.	Usporedba stvarne sile i sile dobivene primjenjujući drugi <i>Newtonov</i> zakon na eksperimentalnim podacima	43
Slika 40.	Krivulje sile udara u apsorber „otvorenog“ profila pri $v_0 = 7 \text{ ms}^{-1}$	44
Slika 41.	Krivulje kinetičke i unutarnje energije uslijed udara u apsorber „otvorenog“ profila pri $v_0 = 7 \text{ ms}^{-1}$	44
Slika 42.	Progresija oštećenja apsorbera „otvorenog“ profila pri $v_0 = 7 \text{ ms}^{-1}$	45
Slika 43.	Deformirani oblik u trenutku maksimalne intruzije udarača ($t = 19,7 \text{ ms}$) u apsorber „otvorenog“ profila pri $v_0 = 7 \text{ ms}^{-1}$	45
Slika 44.	Provođenje eksperimenta	45
Slika 45.	Deformirani uzorak 4	45
Slika 46.	Krivulje intruzije udarača u apsorber „otvorenog“ profila pri $v_0 = 10 \text{ ms}^{-1}$	46
Slika 47.	Usporedba krivulja sile udara na apsorber „otvorenog“ profila pri različitim početnim brzinama udarača	46
Slika 48.	Usporedba krivulja unutarnje energije prilikom udara u apsorber „otvorenog“ profila pri različitim početnim brzinama udarača	47
Slika 49.	Deformirani oblik u trenutku maksimalne intruzije udarača ($t = 20,6 \text{ ms}$) u apsorber „otvorenog“ profila pri $v_0 = 10 \text{ ms}^{-1}$	47
Slika 50.	Progresija oštećenja apsorbera „otvorenog“ profila pri $v_0 = 10 \text{ ms}^{-1}$	47
Slika 51.	Krivulje intruzije udarača u apsorber „zatvorenog“ profila pri $v_0 = 7 \text{ ms}^{-1}$	48
Slika 52.	Krivulje intruzije udarača u apsorber „zatvorenog“ profila pri $v_0 = 10 \text{ ms}^{-1}$	48
Slika 53.	Usporedba krivulja sile udara na apsorber „zatvorenog“ profila pri različitim početnim brzinama	49
Slika 54.	Usporedba krivulja unutarnje energije prilikom udara u apsorber „zatvorenog“ profila pri različitim početnim brzinama udarača	49
Slika 55.	Progresija oštećenja apsorbera „otvorenog“ profila pri $v_0 = 10 \text{ ms}^{-1}$	50
Slika 56.	Deformirani oblik u trenutku maksimalne intruzije udarača ($t = 12,8 \text{ ms}$) u apsorber „zatvorenog“ profila pri $v_0 = 7 \text{ ms}^{-1}$	50
Slika 57.	Progresija oštećenja apsorbera „otvorenog“ profila pri $v_0 = 10 \text{ ms}^{-1}$	50
Slika 58.	Deformirani oblik u trenutku maksimalne intruzije udarača ($t = 16,2 \text{ ms}$) u apsorber „zatvorenog“ profila pri $v_0 = 10 \text{ ms}^{-1}$	51
Slika 59.	Usporedba krivulja unutarnje energije za udar pri $v_0 = 7 \text{ ms}^{-1}$ na apsorber „otvorenog“ i „zatvorenog“ profila	51
Slika 60.	Ovisnost krivulje intruzije udarača o rasporedu slojeva uslijed udara u apsorber „otvorenog“ profila pri $v_0 = 7 \text{ ms}^{-1}$	52
Slika 61.	Ovisnost sile udara o rasporedu slojeva	52
Slika 62.	Ovisnost apsorbirane energije o rasporedu slojeva	53

POPIS TABLICA

Tablica 1. Svojstva CF283 T700 EF455 dobivena iz statičkih testova.....	16
Tablica 2. Vlačna svojstva CF283 T700 EF455 dobivena procesom korelacije.....	16
Tablica 3. Tlačna svojstva CF283 T700 EF455 dobivena procesom korelacije	16
Tablica 4. Smična svojstva CF283 T700 EF455 dobivena procesom korelacije	16
Tablica 5. Svojstva tkanog i jednosmjernog kompozita korištena u <i>Abaqusu</i>	27
Tablica 6. Energija utrošena na popuštanje tkanog kompozita za opće ponašanje	27
Tablica 7. Energija utrošena na popuštanje jednosmjernog kompozita za opće ponašanje ...	30
Tablica 8. Energija utrošena na popuštanje apsorbera „otvorenog“ profila.....	31
Tablica 9. Energija utrošena na popuštanje apsorbera „zatvorenog“ profila	31
Tablica 10. Raspored slojeva apsorbera „otvorenog“ profila	34
Tablica 11. Raspored slojeva apsorbera „zatvorenog“ profila	36
Tablica 12. Reducirane vrijednosti energije utrošene na popuštanje tkanog (W) i jednosmjernog (UD) kompozita	39

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
b_1^c, b_2^c	-	Parametar tlačnog plastičnog očvrstuća u smjerovima 1 i 2
b_{12}	-	Parametar smičnog plastičnog očvrstuća
C_d	MPa	Matrica elastičnosti elementa u kojoj su parametri oštećenja uzeti u obzir
D	-	Parametar oštećenja
d_f	-	Parametar oštećenja vlakana
d_i	-	Faktor inicijacije i propagacije oštećenja
d_m	-	Parametar oštećenja matrice
d_s	-	Parametar posmičnog oštećenja
E	MPa	Modul elastičnosti izotropnog materijala
E_1	MPa	Modul elastičnosti kompozitnog sloja u smjeru pružanja vlakana
E_2	MPa	Modul elastičnosti kompozitnog sloja u smjeru okomitom na pružanje vlakana
E_3	MPa	Modul elastičnosti u smjeru okomitom na ravninu kompozitnog sloja
F_i	MPa ⁻¹	Parametri <i>Tsai-Wu</i> kriterija u koje ulazi čvrstoća kompozita
F_{ij}	MPa ⁻²	Parametri <i>Tsai-Wu</i> kriterija u koje ulazi čvrstoća kompozita
F_f^c	-	Indeks kojim se određuje tlačno popuštanje vlakana
F_f^t	-	Indeks kojim se određuje vlačno popuštanje vlakana
F_m^c	-	Indeks kojim se određuje tlačno popuštanje matrice
F_m^t	-	Indeks kojim se određuje vlačno popuštanje matrice
G^c	Nmm ⁻¹	Energija utrošena na popuštanje
G_{fc}^c	Nmm ⁻¹	Vrijednost energije utrošene na tlačno popuštanje vlakana
G_{ft}^c	Nmm ⁻¹	Vrijednost energije utrošene na vlačno popuštanje vlakana
G_{mc}^c	Nmm ⁻¹	Vrijednost energije utrošene na tlačno popuštanje matrice
G_{mt}^c	Nmm ⁻¹	Vrijednost energije utrošene na vlačno popuštanje matrice
G_{12}	MPa	Modul smičnosti u ravnini 12
G_{23}	MPa	Modul smičnosti u ravnini 23
G_{31}	MPa	Modul smičnosti u ravnini 31
L^c	mm	Karakteristična duljina konačnog elementa
M	-	Operator oštećenja
n_1^c, n_2^c	-	Eksponent tlačnog plastičnog očvrstuća u smjerovima 1 i 2
n_{12}	-	Eksponent smičnog plastičnog očvrstuća

S, S^L, S^T	MPa	Smična čvrstoća u longitudinalnom (L) i transverzalnom (T) smjeru
S_e	-	Dopuštena kutna deformacija
W_p	Jmm ⁻³	Plastični rad
W_p^*	-	Omjer plastičnog i referentnog plastičnog rada
W_p^{ref}	Jmm ⁻³	Referentni plastični rad
$W_{1p}^{\text{max}}, W_{2p}^{\text{max}}$	Jmm ⁻³	Maksimalni plastični rad po jedinici volumena elementa uslijed tlačnog opterećenja u smjerovima 1 i 2
W_{12}^{max}	Jmm ⁻³	Maksimalni plastični rad po jedinici volumena elementa uslijed smičnog opterećenja
X^C, X_c	MPa	Tlačna čvrstoća u pravcu vlakana
X^T, X_t	MPa	Vlačna čvrstoća u pravcu vlakana
X_{ec}	-	Dopuštena tlačna deformacija u pravcu vlakana
X_{et}	-	Dopuštena vlačna deformacija u pravcu vlakana
Y^C, Y_c	MPa	Tlačna čvrstoća okomito na pravac vlakana
Y^T, Y_t	MPa	Vlačna čvrstoća okomito na pravac vlakana
Y_{ec}	-	Dopuštena tlačna deformacija okomito na pravac vlakana
Y_{et}	-	Dopuštena vlačna deformacija okomito na pravac vlakana
α	-	Parametar kojim se u <i>Abaqusu</i> određuje utjecaj posmičnih naprežanja u nastajanju oštećenja vlakana pri vlačnom opterećenju
α	-	Faktor redukcije F_{12} parametra u <i>HyperWorksu</i>
δ_{eq}^f	mm	Ekvivalentni pomak pri kojem se javlja potpuno popuštanje sloja
δ_{eq}^0	mm	Ekvivalentni pomak pri kojem se oštećenje inicira
$\boldsymbol{\varepsilon}$	-	Tenzor deformacija
$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}$	s ⁻¹	Brzina deformacije
$\varepsilon_{f1}, \varepsilon_{f2}$	-	Maksimalna vlačna deformacija u smjerovima 1 i 2 prilikom koje nastupa brisanje elementa
$\varepsilon_{m1}, \varepsilon_{m2}$	-	Maksimalna vlačna deformacija u smjerovima 1 i 2 prilikom koje naprežanje ima vrijednost ovisnu o parametru oštećenja d_{max}
$\varepsilon_{t1}, \varepsilon_{t2}$	-	Vrijednost vlačne deformacije u smjerovima 1 i 2 nakon koje se naprežanje počinje smanjivati
$\dot{\varepsilon}_0$	s ⁻¹	Referentna brzina deformacije
$\varepsilon_1^{c1}, \varepsilon_2^{c1}$	-	Inicijalna tlačna deformacija u smjerovima 1 i 2 prilikom koje počinje popuštanje materijala
ε_{12}^1	-	Inicijalna kutna deformacija prilikom koje počinje popuštanje materijala
$\varepsilon_1^{c2}, \varepsilon_2^{c2}$	-	Maksimalna tlačna deformacija u smjerovima 1 i 2 za popuštanje materijala

ε_{12}^2	-	Maksimalna kutna deformacija za popuštanje materijala
ν	-	<i>Poissonov</i> faktor izotropnog materijala
ν_{12}	-	<i>Poissonov</i> faktor u ravnini 12
ν_{23}	-	<i>Poissonov</i> faktor u ravnini 23
ν_{31}	-	<i>Poissonov</i> faktor u ravnini 31
ρ	kgm ⁻³	Gustoća
σ	MPa	Tenzor nominalnog naprezanja
$\hat{\sigma}$	MPa	Efektivni tenzor naprezanja
σ_{eq}	MPa	Ekvivalentno naprezanje
σ_i, σ_{ij}	MPa	Komponente tenzora naprezanja
σ_i^c	MPa	Vrijednost graničnog tlačnog naprezanja u smjeru 1 ili 2 prilikom kojeg se materijal počinje ponašati nelinearno
σ_i^{red}	MPa	Naprezanje reducirano s obzirom na faktor oštećenja
σ_i^t	MPa	Vrijednost graničnog vlačnog naprezanja u smjeru 1 ili 2 prilikom kojeg se materijal počinje ponašati nelinearno
$\sigma_{1max}^c, \sigma_{2max}^c$	MPa	Maksimalno tlačno naprezanje u smjerovima 1 i 2
$\sigma_{1max}^t, \sigma_{2max}^t$	MPa	Maksimalno vlačno naprezanje u smjerovima 1 i 2
$\sigma_{1rs}^c, \sigma_{2rs}^c$	MPa	Zaostalo tlačno naprezanje u smjerovima 1 i 2
$\sigma_{1y}^c, \sigma_{2y}^c$	MPa	Tlačno naprezanje u smjerovima 1 i 2 nakon kojeg se materijal prestaje ponašati elastično
$\sigma_{1y}^t, \sigma_{2y}^t$	MPa	Vlačno naprezanje u smjerovima 1 i 2 nakon kojeg se materijal prestaje ponašati elastično
σ_{12max}	MPa	Maksimalno smično naprezanje
σ_{12rs}	MPa	Zaostalo smično naprezanje
σ_{12y}	MPa	Smično naprezanje nakon kojeg se materijal prestaje ponašati elastično
σ_{12}	MPa	Vrijednost graničnog smičnog naprezanja prilikom kojeg se materijal počinje ponašati nelinearno

SAŽETAK

U ovom radu je izvršena simulacija različitih kompozitnih konstrukcija u uvjetima udarnog opterećenja.

U uvodnom dijelu rada se nalazi kratki povijesni pregled početka upotrebe kompozitnih materijala u automobilske industriji. Nadalje, istaknut je najveći nedostatak kompozitnih konstrukcija te je opisana hipoteza rada koja može doprinijeti savladavanju nedostatka na adekvatan način.

U drugom poglavlju rada su istaknute karakteristike kompozitnih materijala važne za opće razumijevanje rada, navedene su najvažnije prednosti i nedostaci spomenutih materijala u odnosu na konvencionalne konstrukcijske materijale, dan je povijesni pregled razvoja metoda za ispitivanje udarnih oštećenja kompozita, istaknuti su najčešći načini popuštanja te su spomenuti općeprihvaćeni kriteriji popuštanja.

U trećem poglavlju su opisani programski paketi, odnosno kriteriji popuštanja korišteni za procjenu oštećenja ispitivanih komponenti uslijed udarnih opterećenja, istaknute su značajne razlike među njima, a uspoređeni su korištenjem testa na jednom ljuskastom elementu.

Četvrto poglavlje rada donosi opis numeričkih modela te odabir adekvatnog materijalnog modela s obzirom na dostupne eksperimentalne rezultate.

Peto poglavlje rada je posvećeno interpretaciji, odnosno usporedbi rezultata za razne oblike konstrukcijskih komponenti kao i za razne vrste opterećenja istih.

U završnom poglavlju je iznesen kritički osvrt na provedenu analizu, dan je pregled primjene različitih materijalnih modela te zaključak o prikladnosti primjene istih ovisno o problemu koji se rješava.

Ključne riječi: kompozitne konstrukcije, udarno opterećenje, kriteriji popuštanja, numeričko modeliranje, apsorber, tkani kompozit.

SUMMARY

In this thesis, a numerical simulation of the different composite structures in impact loading conditions has been carried out.

The introduction fragment presents a short historical preview of how the implementation of composite materials had started in the automotive industry. Further, the main disadvantage of composite structures has been highlighted. Lastly, the hypothesis that could adequately contribute to mastering the main disadvantage has been described.

In the second chapter, the characteristics of composite materials, essential for the understanding of the work, have been highlighted. Then, the significant advantages and disadvantages of the mentioned materials in comparison with conventional structural materials have been stated. Also, the historical review of the methods for the impact damage testing in composites has been given. Further, the most common failure modes have been highlighted. Lastly, generally accepted failure criteria have been mentioned.

In the third chapter, the used software, i.e. the failure criteria used for the impact loading damage prediction of the tested structures, have been described. Then, the main differences between them have been highlighted and compared using the one shell element test.

The fourth chapter includes the description of the numerical models and the choice of the most appropriate material model, considering available experimental results.

The fifth chapter has been devoted to the interpretation, i.e. the comparison of the results for different structural shapes and the associated loading conditions.

In the final section, a critical review of the analysis is presented. Then, an overview of the application of different material models has been provided. Lastly, a conclusion on the suitability of application of the evaluated material models based on the analysed problem has been given.

Keywords: composite structures, impact load, failure criteria, numerical modelling, absorber, woven composite.

1. UVOD

Ubrzani razvoj kompozitnih materijala je potaknut prvenstveno zahtjevima zrakoplovne, ali sve više i automobilske industrije za materijalima koji su lagani, ali i dalje imaju povoljna mehanička svojstva. Produkt toga razvoja su vozila sa znatno smanjenom masom za koja je potrebno puno manje energije za pokretanje što vodi mogućnosti smanjenja potrošnje goriva. Smanjena potrošnja goriva ne samo da smanjuje utjecaj na zagađivanje okoliša, nego smanjuje i troškove rada vozila. Uvidjevši tu, ali i mnoge druge prednosti kompozitnih materijala, inženjeri stvaraju novu, perspektivnu klasu materijala koji pružaju obećavajuće izgleda za modernu tehnologiju.

Povijesno gledajući, automobil u kojem su prvi put zabilježeni kompozitni dijelovi bio je *Chevrolet Corvette Roadster* iz 1953. godine prikazan na slici 1 u kojem su za ojačanje karoserije korišteni kompoziti sa staklenim vlaknima.



Slika 1. 1953 *Chevrolet Corvette Roadster* [1]

Nadalje, u sportskim/trkaćim automobilima veliku ulogu igraju ugljičnim vlaknima ojačani polimeri, tzv. CFRP (*eng. Carbon Fiber Reinforced Polymer*), a prva primjena zabilježena je kod *McLarenovog* bolida MP4/1 iz 1981. godine čiji je monokok prikazan u lijevom kutu slike 2 u cijelosti proizveden od spomenutih kompozita.

U današnje vrijeme sve više je popularna industrija tzv. hiperautomobila. *Hypercar* ili hiperautomobil definira se kao automobil čije performanse nadilaze sve ostale automobile, a karakterizira ga lagana, aerodinamična konstrukcija, kompozitni materijali, hibridni pogon i slično. Pripadaju skupini automobila najviših performansi, najnaprednije tehnologije i aerodinamičnog oblika koje automobilska industrija trenutno može ponuditi pa kao takvi

pomiču sve granice dosadašnje tehnologije na tom području. Jedan od poznatih proizvođača električnih hiperautomobila hrvatska je tvrtka Rimac Automobili d.o.o.



Slika 2. McLarenovi okviri od kompozita s ugljičnim vlaknima [2]

Na slici 3 prikazan je *C_Two* automobil spomenute tvrtke s istaknutim monokokom koji je u potpunosti izrađen od kompozita s ugljičnim vlaknima. Nadalje, na monokok se nastavlja krov kao i stražnji okvir te baterijski paket presvučen kompozitima s ugljičnim vlaknima, a na slici je moguće primijetiti i odbojnice izrađene od aluminija i ugljičnih kompozita.



Slika 3. C_Two tvrtke Rimac Automobili d.o.o. [3]

Međutim, iako kompoziti postaju materijali novog doba, ne smije se zanemariti njihov najveći nedostatak, odnosno osjetljivost na udarna opterećenja zbog čega se javlja potreba za učestalim ispitivanjem njihovih svojstava. Nadalje, kako na konstrukcije izrađene od takvih materijala utječu mnogobrojni parametri, praktički je nemoguće donijeti generalan zaključak o ponašanjima istih. Naime, struktura kompozitnog materijala može varirati zbog različitih konstrukcijskih i materijalnih kombinacija zbog čega posljedice udarnih opterećenja za razne strukturne kombinacije kompozitnih tvorevina nisu iste.

Uzevši u obzir sve navedeno, stavlja se sve veći naglasak na razumijevanje fenomena udarnog oštećenja, a osim eksperimentalnog ispitivanja u današnje se vrijeme sve više razvijaju i numerička rješenja za opisivanje navedenog problema.

Cilj ovog rada je razviti odgovarajući numerički model koji oponaša udarna opterećenja te razmotriti oštećenja koja nastaju prilikom tog. Materijalni modeli za kompozit oznake CF283 T700 EF455 2x2 *Twill* razvijeni unutar ovog rada korelirani su zahvaljujući eksperimentalnim ispitivanjima provedenim za tvrtku Rimac Automobili d.o.o. Koristeći spomenuti materijalni model kao i niz drugih kompozitnih materijalnih modela, formiran je cjelokupan numerički model *C_Two* automobila na kojem su provedena realna i virtualna ispitivanja sudara (*eng. crash test*) pri čemu je prvi krug ispitivanja proveden upravo s ciljem validacije materijalnih modela koji će se koristiti u budućim simulacijama.

S obzirom na to da se za mjeru otpornosti na pojavu oštećenja kompozitnih konstrukcija pri udarnom opterećenju uzima sposobnost apsorpcije energije, modelirana su dva različita uzorka nazvana „otvoreni“ i „zatvoreni“ profil kako bi se pokazalo kako i sam oblik konstrukcije znatno utječe na svojstva kompozita, odnosno sposobnost apsorpcije zbog čega je nerealno koristiti isti numerički, tj. materijalni model bez obzira što se radi o istom kompozitnom materijalu.

Numerička analiza udarnih oštećenja u višeslojnim kompozitnim konstrukcijama pri različitim brzinama udara izvršena je pomoću metode konačnih elemenata unutar programskog paketa *HyperWorks* u sklopu tvrtke Rimac Automobili d.o.o. te koristeći programski paket *Abaqus/Explicit* kako bi se provjerio utjecaj korištenja različitih softvera kao i različitih kriterija popuštanja.

2. KOMPOZITNI MATERIJALI

Općenito govoreći, kompoziti su tvorevine dobivene umjetnim spajanjem najmanje dva konstituenta s ciljem postizanja specifičnih karakteristika i svojstava, kakva niti jedan od konstituenata ne posjeduje zasebno.

Svaki kompozitni materijal sastavljen je od matrice i ojačala pa je ukupno ponašanje kompozita određeno [4]:

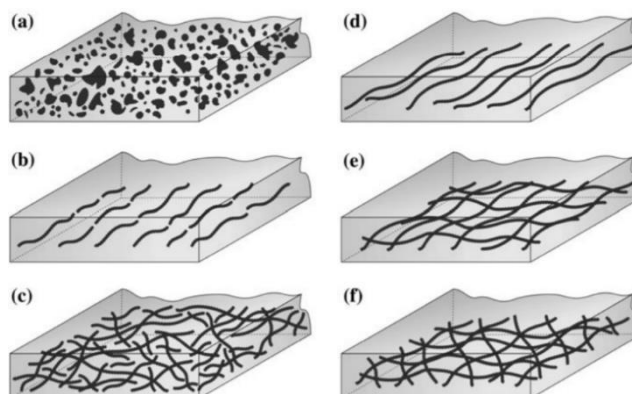
- svojstvima materijala matrice i ojačala,
- veličinom i rasporedom konstituenata,
- volumnim udjelom konstituenata,
- oblikom konstituenata,
- prirodom i jakošću veza među konstituentima.

Matrice mogu biti polimerne, ugljične, metalne, keramičke i dr., a njihova osnovna zadaća je da povežu vlakna te da služe kao medij kojim se izvana nametnuto naprezanje prenosi i raspoređuje na vlakna (samo mali dio nametnutog opterećenja nosi matrica). Nadalje, matrica služi kao prepreka napredovanju pukotina, odnosno funkcija matrice je da pojedinačna vlakna zaštititi od površinskog oštećivanja do kojih može doći mehaničkom abrazijom ili kemijskim reakcijama od strane okolnog medija. Takve reakcije mogu izazvati tečenje na površini koje može voditi do pukotina, a one mogu voditi do oštećivanja pri nižim vlačnim naprezanjima što za posljedicu ima odvajanje matrice od vlakana te propagaciju krhkog loma od vlakna do vlakna [5].

Iako mogu doći i u obliku čestica, ojačala su najčešće u obliku vlakna te predstavljaju osnovni nosivi element kompozita koji mu daje čvrstoću. Uglavnom su ugljična, staklena, aramidna i metalna, a čine 60-70% volumnog udjela u kompozitu [6]. Osim po vrsti materijala, kompozitna ojačala se razlikuju i s obzirom na veličinu i usmjerenost pa su tako prema [6] prisutni:

- čestice kao ojačala (a),
- jednosmjerna diskontinuirana vlakna (b),
- slučajno usmjerena diskontinuirana vlakna (c),
- jednosmjerna kontinuirana vlakna (d),
- ortogonalna kontinuirana vlakna [0/90] (e),
- višesmjerna kontinuirana vlakna (f).

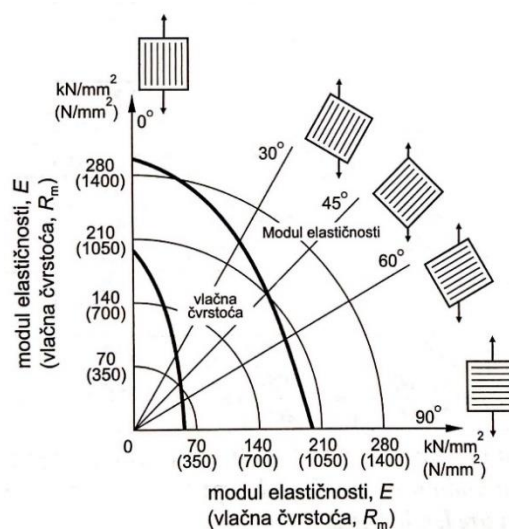
Spomenute vrste ojačala ilustrirane su na slici 4.



Slika 4. Kompozitna ojačala [6]

Kod jednosmjernih kompozita do izražaja dolazi anizotropnost pa se koriste kod izrade proizvoda koji zahtijevaju bolja mehanička svojstva u jednom smjeru. S druge pak strane, ako se kompozitnim materijalom žele postići jednoličnija svojstva uz žrtvovanje maksimalne čvrstoće, koriste se višesmjerni kompoziti.

Na slici 5 je dan primjer utjecaja usmjerenja vlakana s obzirom na naprezanje za Ti-leguru ojačanu vlaknima bora.



Slika 5. Utjecaj usmjerenja vlakana s obzirom na naprezanje za Ti-leguru ojačanu vlaknima bora [5]

2.1. Prednosti kompozitnih materijala

Uspoređujući ih s konvencionalnim konstrukcijskim materijalima, kompoziti iskazuju mnogobrojne prednosti, a neke od njih su [4]:

- otpornost na koroziju,
- mala gustoća i mala masa,
- povoljan odnos čvrstoće i gustoće (specifična čvrstoća),
- povoljan odnos modula elastičnosti i gustoće (specifična krutost),
- mogućnost proizvodnje dijelova složenog oblika,
- jednostavno i jeftino održavanje,
- dulji vijek trajanja,
- mogućnost „projektiranja“ konstrukcije i svojstava.

2.2. Nedostatci kompozitnih materijala

S obzirom na to da su sastavljeni od više konstituenata, najveći nedostatak kompozitnih materijala kao što je spomenuto u uvodnom dijelu, njihova je izrazita osjetljivost na udarna opterećenja. Upravo zbog toga, materijale koji se koriste u proizvodnji kompozitnih konstrukcija potrebno je podvrgnuti testovima kako bi se utvrdila njihova otpornost na spomenuta opterećenja. Takva opterećenja mogu se klasificirati prema brzini udara objekta, ali i prema iznosu kinetičke energije objekta koji uzrokuje udarno opterećenje.

Prema [8] postoje četiri kategorije udarnog opterećenja:

- udarno opterećenje pri maloj brzini,
- udarno opterećenje pri velikoj brzini,
- balistički udar,
- orbitalni udar.

Ispitivanja s malim brzinama zahtijevaju veću masu, dok je za velike brzine i balističke udare potrebna mala masa.

Udar pri niskim brzinama podrazumijeva se pri brzinama ispod 10 m/s, dok se utjecaj velike brzine razmatra u rasponu brzina od 10 do 50 m/s. Primjer udarnog opterećenja pri maloj brzini je pad alata prilikom rada dok se za primjer utjecaja velike brzine mogu navesti udari ostataka stranih objekata na pisti ili dijelova gume u konstrukciju aviona.

Balistički udar se događa brzinom od 50 do 1000 m/s, a orbitalni u rasponu od 2 do 5 km/s. Primjeri balističkog udara uključuju udare ptica tijekom leta ili eksplozivnih dijelova oružja dok su primjer orbitalnog utjecaja, također poznatog kao hiperbrzinski utjecaj, orbitalni ostaci koji putuju u svemiru i pogode satelit ili svemirsku letjelicu.

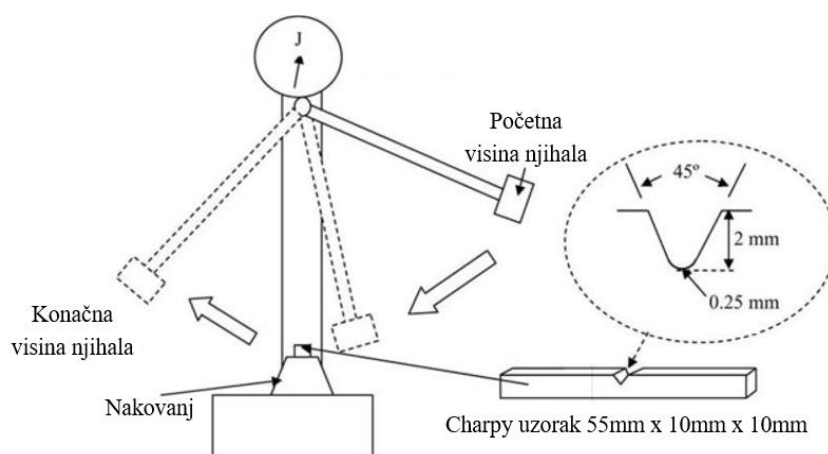
Udarom stranog objekta na kompozitnu konstrukciju mogu se javiti značajna oštećenja, a nerijetko se neka od njih teško otkrivaju vizualnom inspekcijom. Konstrukcije na kojima se udarna oštećenja teško detektiraju vizualnom inspekcijom potrebno je podvrgnuti drugim nerazornim metodama ispitivanja zbog opasnosti od postojanja jedva vidljivih udarnih oštećenja tzv. BVID (eng. *Barely Visible Impact Damage*).

2.3. Testiranje kompozitnih materijala na udarna oštećenja [9]

Početak razvoja testiranja kompozitnih materijala na udarna oštećenja zabilježen je pojavom ugljičnih vlakana sredinom 1960-ih. Naime, ugljična vlakna su relativno krhka i shodno tome ne podnose dobro udarna opterećenja što nije slučaj za staklena vlakna koja su se u to vrijeme najviše koristila kao ojačanje kompozitnih materijala. Budući da je statička čvrstoća i krutost ugljičnim vlaknima ojačanih kompozita bila od iznimne važnosti, nastavio se trend korištenja istih za ojačavanje konstrukcija.

Početak 1970-ih javlja se potreba za opisivanjem reakcije kompozita ojačanih ugljičnim vlaknima na udarna opterećenja, a prvi pokušaji proučavanja odziva kompozita sa svim vrstama ojačanja na spomenuta opterećenja usredotočeni su na upotrebu *Charpy* metode koja je prvobitno razvijena za ispitivanje metala, a kasnije se upotrebljavala i za testiranje plastike.

Charpyjev testom se ispituje uzorak dimenzija $55 \times 10 \times 10$ mm³ savijanjem u tri točke induciranim udarom njihala kao što je prikazano na slici 6.



Slika 6. *Charpy* test [10]

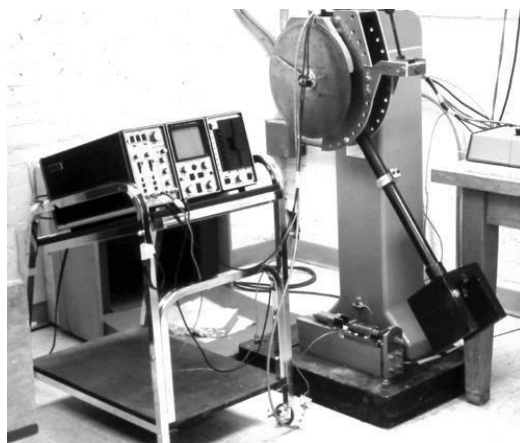
Ispitni uzorak sadrži zarez dubok 2 mm pod kutom od 45° na strani vlačnog naprezanja kako bi se na tom mjestu lakše inicirao lom, a uzorku se prenosi toliko energije da bi se osiguralo njegovo potpuno lomljenje tijekom udara. Količina energije koju uzorak apsorbira definira se

kao potencijalna energija $\rho g \Delta h$ gdje je Δh visina koja se odnosi na razliku početne i konačne visine njihala nakon loma uzorka.

U vrijeme kada se *Charpy* test počeo koristiti za ispitivanje kompozita, njihala su bila opremljena s piezoelektrikom, što je omogućilo generiranje krivulje sile u ovisnosti o vremenu, a integrirajući područje ispod te krivulje mogla se odrediti apsorbirana energija kao funkcija vremena.

Za razliku od metala i plastike, kod kojih se u korijenu zareza može jednostavno izazvati vlačno naprezanje, kod kompozitnih materijala to je veoma složeno. Naime, na samo jednom uzorku moguće je postići sva 3 osnovna oblika oštećenja istovremeno; vlačno, tlačno i smično. Odnosno, oblik oštećenja kompozita je nekonzistentan, pa je teško povezati izmjerenu apsorbiranu energiju *Charpy* uzorka s energijom od stvarne konstrukcijske komponente zbog čega se metoda ne koristi na kompozitnim uzorcima.

Sve veći naglasak stavlja se na ispitivanje čistim vlačnim opterećenjem. Test se odvija na način da njihalo, prolazeći preko jednog kraja uzorka koji je pričvršćen na dnu ispitnog stroja, pogodi izbočinu pričvršćenu na drugi kraj, podvrgavajući uzorak vlačnom naprezanju kao što je prikazano na slici 7.



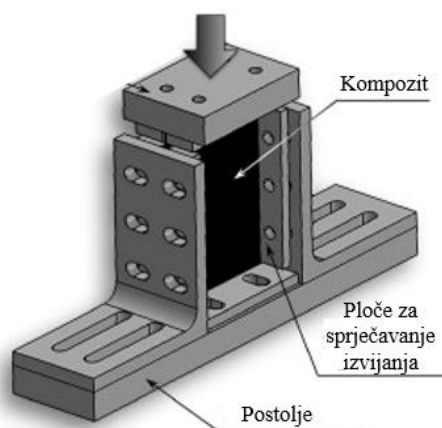
Slika 7. Aparatura za ispitivanje čistog vlačnog naprezanja [9]

Međutim, nakon brojnih istraživanja utvrđeno je da su naprezanja/deformacije dobivene dinamičkim ispitivanjem kompozita drugačije od njihovih odziva primjenom statičkih ispitivanja. Kao rezultat toga, koncept razvoja testova čistim vlačnim udarnim opterećenjima također je napušten.

Budući da je i dalje važan problem potencijalno oštećenje kompozitnih konstrukcija uzrokovano udarima male brzine, kao što bi moglo doći uslijed pada alata na krila zrakoplova

ili uslijed automobilske komponente naletjele na nepomični objekt, razvija se nova metoda ispitivanja udarnih oštećenja kompozita. Naime, radi se o tzv. *Drop testu* kojim se ispituje ravna ploča opterećena padajućom masom. Brojni istraživački radovi provedeni su tijekom 1980-ih, a razvijena je i odgovarajuća oprema za testiranje koja se sastojala od tornja s vodilicama za udarač (s utezima) koji je izazivao oštećenje te od pripadajuće opreme za mjerenje podataka. Metoda se kao takva koristi i danas pri čemu se ploča dimenzija $150 \times 150 \text{ mm}^2$ jednostavno podupire na sve četiri strane, a zatim udara u sredini. Udarna glava obično je hemisfernog oblika s promjerom od 15 mm, a udarna energija može se pomjerati ovisno o zahtjevima testa. Stoga, ispitni tehničari imaju mogućnost osigurati potpunu penetraciju pri čemu je od interesa najveća sila i energija apsorbirana do maksimalne sile i/ili ukupna energija apsorbirana tijekom procesa pune penetracije. Alternativno, ispitna ploča može biti izložena propisanoj razini udarne energije odabrane da izazove lokalno oštećenje bez prodora. Stoga, kad je namjera inducirati, a zatim otkriti oštećenja koja možda nisu vidljiva vizualnim pregledom konstrukcije, koristi se ultrazvučni *C-scan*.

Nadalje, da bi se utvrdilo opadanje čvrstoće, nakon udarnog testa ploča može biti izložena statičkom opterećenju za što se koristi tzv. tlačni test nakon udara (CAI – *Compression After Impact*). Za provođenje spomenutog testiranja ASTM D7137,5 standard zahtijeva uzorak $100 \times 150 \text{ mm}^2$ koji je prethodno podvrgnut udarnom testu i jednolično ga tlačno opterećuje pritiskom na 100 mm dugački rub pri čemu je uzorak oslonjen duž sva četiri ruba kako bi se spriječilo izvijanje kao što je prikazano na slici 8.



Slika 8. Oprema za tlačni test nakon udara (CAI) [11]

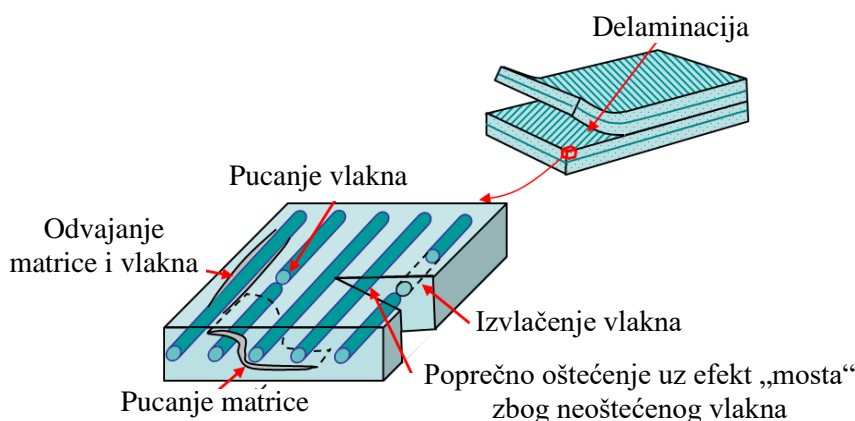
Iako je u početku namijenjen za ispitivanje ravne ploče, danas se *Drop test* upotrebljava za ispitivanje raznih oblika uzoraka pri čemu se koriste razne izvedbe udarača kao što će biti prikazano u nastavku.

2.4. Načini popuštanja kompozita

Glavni oblici oštećenja višeslojnih kompozita, najčešće uslijed spomenutih udarnih opterećenja, su [11]:

- intralaminarna oštećenja - pukotina se nalazi unutar sloja kompozitne konstrukcije: pucanje matrice i vlakana, odvajanje matrice i vlakana te izvijanje vlakana,
- interlaminarna oštećenja - pukotina se nalazi između dva susjedna kompozitna sloja na mjestu međusobnog spajanja: delaminacija,
- poprečno oštećenje - smjer pukotine je okomit na kompozitne slojeve.

Neki od načina popuštanja kompozita ilustrirani su na slici 9.



Slika 9. Načini popuštanja jednosmjernih kompozita [13]

2.5. Kriteriji popuštanja

U usporedbi s izotropnim materijalima za čije je opisivanje elastičnog ponašanja dovoljno poznavanje dviju materijalnih konstanti (E i ν), za opisivanje istog ponašanja kod pravilno raspoređenih kontinuiranih kompozitnih slojeva, koji se razmatraju kao ortotropni materijali, potrebno je poznavati devet materijalnih konstanti (E_1 , E_2 , E_3 , ν_{12} , ν_{23} , ν_{31} , G_{12} , G_{23} i G_{31}).

S obzirom na prethodno navedeno, jasno je da se za opisivanje popuštanja kompozitnih materijala ne može koristiti pristup krhkog ili duktilnog loma kao kod konvencionalnih konstrukcijskih materijala.

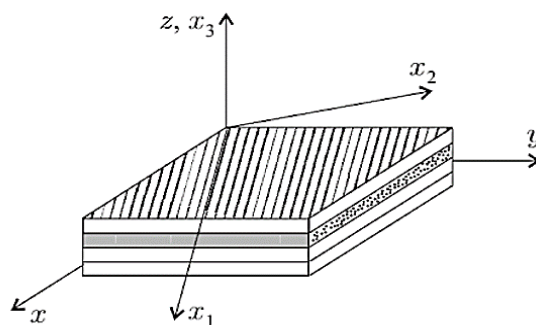
Iako se neprestano teži razvijanju univerzalnog kriterija za opisivanje popuštanja kompozita, praktički je nemoguće predvidjeti ponašanje istih zbog čega se ovisno o problemu koji se rješava koristi više različitih kriterija. Prema [6], najpoznatiji i najšire prihvaćeni kriteriji popuštanja su:

- Kriterij maksimalnih naprezanja,
- Kriterij maksimalnih deformacija,
- *Tsai-Hill* kriterij,
- *Tsai-Wu* kriterij,
- *Puckov* kriterij,
- *Hashinov* kriterij.

Kriteriji se uvijek postavljaju za jedan sloj pri čemu su naprezanja definirana u glavnom materijalnom sustavu (Slika 10), a za njihovo provođenje nužno je poznavanje pet parametara čvrstoće [6]:

- X_t - vlačna čvrstoća u pravcu vlakana,
- X_c - tlačna čvrstoća u pravcu vlakana,
- Y_t - vlačna čvrstoća okomito na pravac vlakana,
- Y_c - tlačna čvrstoća okomito na pravac vlakana,
- S - smična čvrstoća.

Zbog lakšeg razumijevanja, na slici 10 je prikazan globalni (xyz) i materijalni ($x_1x_2x_3$) koordinatni sustav.



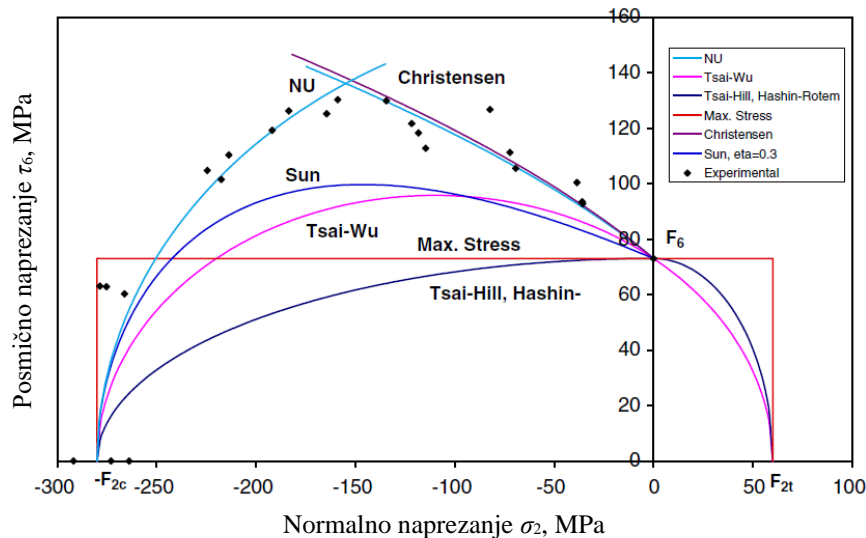
Slika 10. Definicija globalnog i materijalnog koordinatnog sustava [14]

Nadalje, ukoliko se koristi kriterij maksimalnih deformacija, potrebno je poznavati pet parametara deformacija [6]:

- X_{et} - dopuštena vlačna deformacija u pravcu vlakana,
- X_{ec} - dopuštena tlačna deformacija u pravcu vlakana,
- Y_{et} - dopuštena vlačna deformacija okomito na pravac vlakana,
- Y_{ec} - dopuštena tlačna deformacija okomito na pravac vlakana,
- S_e - dopuštena kutna deformacija.

Važno je naglasiti da vrijednosti naprezanja koje ulaze u kriterije nisu glavne (svojstvene) vrijednosti tenzora naprezanja nego vrijednosti naprezanja u sustavu glavnih materijalnih osi jednog sloja.

Na slici 11 je prikazan primjer teoretski pretpostavljenih krivulja popuštanja uslijed posmičnog i normalnog naprezanja u transverzalnom smjeru za jednosmjerni karbon/epoksi kompozit te njihova usporedba s eksperimentalnim rezultatima.

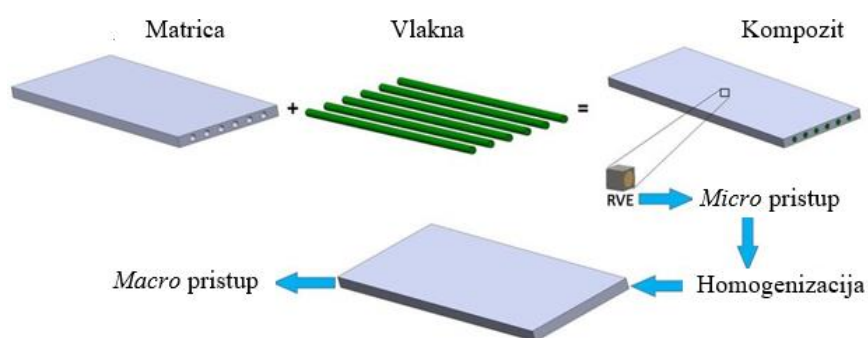


Slika 11. Krivulje popuštanja uslijed posmičnog i normalnog naprezanja u transverzalnom smjeru za jednosmjerni karbon/epoksi kompozit [15]

Kriteriji korišteni za rješavanje zadane problematike biti će opisani u nastavku rada dok se o ostalima nešto više može pročitati u [6].

3. MATERIJALNI MODEL

Numeričkom modeliranju kompozitnih konstrukcija pristupa se na više raznih načina bilo da se radi o pojedinom sloju ili cjelokupnom laminatu. Naime, modeliranje na razini sloja moguće je podijeliti na *micro* i *macro* pristup kao što je ilustrirano na slici 12. *Micro* pristup se uglavnom koristi prilikom znanstvenih istraživanja pri čemu se svaki od konstituenata modelira zasebno i naglasak se stavlja na kontrolu međudjelovanja konstituenata. S druge strane, kod modeliranja realnih konstrukcija koristi se *macro* pristup pri čemu se zadavanjem svojstava sloja definira generalno ponašanje sloja kao cjeline.



Slika 12. Modeliranje na razini sloja [16]

Ovisno o zahtijevanim detaljima analize, modeliranju na razini laminata pristupa se uglavnom na dva načina. Prvi način podrazumijeva modeliranje slojeva koristeći *macro* pristup na razini sloja te povezivanje tako definiranih slojeva tzv. kohezivnim elementima čija je svrha opisati i simulirati možebitnu delaminaciju. S druge strane, modeliranje se može izvesti korištenjem samo jednog elementa po debljini i definiranjem slojeva kroz svojstvo elementa. Iako prvi način realnije opisuje kompozitnu konstrukciju, računalno je skuplji i dugotrajniji zbog čega se prilikom numeričkog ispitivanja velikih sklopova (npr. automobil) rijetko koristi.

S obzirom na navedeno, u ovom radu koristit će se drugi pristup na razini laminata kako bi se razvio odgovarajući materijalni model koji bi se kao takav ubuduće koristio za numeričku simulaciju sudara *C_Two* automobila tvrtke Rimac Automobili d.o.o.

3.1. HyperWorks

3.1.1. Tsai-Wu kriterij [6]

Tsai-Wu kriterij koji se naziva i tenzorski ili kvadratični kriterij popuštanja spada među najčešće korištene, a njegov tenzorski zapis glasi:

$$F_i \sigma_i + F_{ij} \sigma_i \sigma_j = 1, \quad (1)$$

gdje su F_i te F_{ij} parametri u koje ulazi čvrstoća kompozita pri čemu su $i, j = 1, \dots, 6$.

U prethodnoj definiciji kao i u nastavku objašnjenja kriterija korištena je *Voightova* konvencija definiranja redosljeda komponenti tenzora naprezanja:

$$\sigma_{ij} = \{\sigma_{11} \quad \sigma_{22} \quad \sigma_{33} \quad \sigma_{23} \quad \sigma_{13} \quad \sigma_{12}\}^T, \quad (2)$$

ili u skraćenom obliku:

$$\sigma_i = \{\sigma_1 \quad \sigma_2 \quad \sigma_3 \quad \sigma_4 \quad \sigma_5 \quad \sigma_6\}^T. \quad (3)$$

Raspisani kriterij sastoji se od ukupno 42 člana, ali ako se u obzir uzme ravninsko stanje naprezanja ostaju samo indeksi 1, 2 i 6 pa tako definirani kriterij ima 9 članova:

$$F_1 \sigma_1 + F_2 \sigma_2 + F_6 \sigma_6 + F_{11} \sigma_1^2 + F_{22} \sigma_2^2 + F_{66} \sigma_6^2 + 2F_{12} \sigma_1 \sigma_2 + 2F_{16} \sigma_1 \sigma_6 + 2F_{26} \sigma_2 \sigma_6 = 1. \quad (4)$$

Kako u jednadžbi (4) predznak posmičnog naprezanja ne smije utjecati na vrijednost kriterija, svi članovi koji posjeduju σ_6 (ne σ_6^2) jednaki su nula pa jednadžba (4) ima oblik:

$$F_1 \sigma_1 + F_2 \sigma_2 + F_{11} \sigma_1^2 + F_{22} \sigma_2^2 + F_{66} \sigma_6^2 + 2F_{12} \sigma_1 \sigma_2 = 1. \quad (5)$$

Parametri F_1 te F_{11} dobiju se razmatranjem slučaja $\sigma_1 \neq 0$ dok su sve ostale komponente tenzora naprezanja nula. *Tsai-Wu* tada daje dva izraza, za pozitivan i negativan predznak σ_1 :

$$\begin{aligned} F_1 X_t + F_{11} X_t^2 &= 1, \\ F_1 X_c + F_{11} X_c^2 &= 1. \end{aligned} \quad (6)$$

Rješavanjem prethodnog sustava jednadžbi dobije se:

$$\begin{aligned} F_1 &= \frac{1}{X_t} + \frac{1}{X_c}, \\ F_{11} &= -\frac{1}{X_t X_c}. \end{aligned} \quad (7)$$

Analognim postupkom razmatranjem slučaja $\sigma_2 \neq 0$ dobiju se parametri F_2 te F_{22} :

$$\begin{aligned} F_2 &= \frac{1}{Y_t} + \frac{1}{Y_c}, \\ F_{22} &= -\frac{1}{Y_t Y_c}. \end{aligned} \quad (8)$$

Parametar F_{66} dobije se razmatranjem slučaja $\sigma_6 \neq 0$:

$$F_{66} = \frac{1}{S^2}. \quad (9)$$

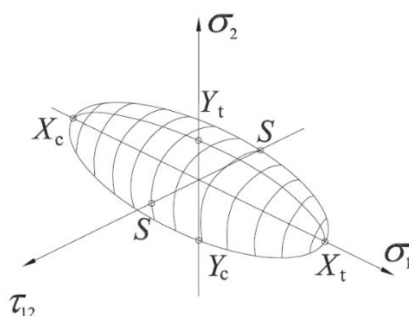
Preostali parametar F_{12} nemoguće je dobiti uniaksijalnim testom već bi se za njegovo određivanje trebao provoditi biaksijalni test. Međutim, najčešće se koristi drugi, jednostavniji zapis koji glasi:

$$F_{12} = -\frac{1}{2}\sqrt{F_{11}F_{22}}. \quad (10)$$

Naposlijetku, zapis *Tsai-Wu* kriterija glasi:

$$F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\sigma_6^2 - \sqrt{F_{11}F_{22}}\sigma_1\sigma_2 = 1. \quad (11)$$

Na slici 13 je prikazana površina popuštanja prema *Tsai-Wu* kriteriju koja ima elipsoidan oblik.



Slika 13. Površina popuštanja prema *Tsai-Wu* kriteriju [6]

Važno je napomenuti da kriterij ne indicira način na koji će sloj popustiti već samo naprezanje prilikom kojeg će sloj popustiti.

3.1.2. Materijalna kartica u *HyperWorks*u [17]

Unutar programskog paketa *HyperWorks*, odnosno njegovog pred procesora *HyperCrash*, eksplicitnog rješavača *Radioss* i post procesora *HyperView* te uz pomoć niza statičkih i dinamičkih testova provedenih na kompozitnom materijalu CF283 T700 EF455 2x2 *Twill*, procesom korelacije formirane su tri materijalne kartice korištene za opisivanje općeg ponašanja, apsorbera „otvorenog“ i „zatvorenog“ profila.

U tablici 1 ispisana su svojstva dobivena iz statičkih testova dok se u tablicama od 2 do 3 nalaze vlačna, tlačna i smična svojstva dobivena procesom korelacije između realnih statičkih i dinamičkih testova te numeričkih simulacija za opisivanje općeg ponašanja. Iako se materijalne kartice za opisivanje apsorbera „otvorenog“ i „zatvorenog“ profila u određenim parametrima razlikuju u odnosu na spomenutu, zbog zaštite povjerljivih podataka u tablicama se nalaze samo svojstva za opisivanje općeg ponašanja kako bi se u nastavku pobliže opisao postupak korelacije s materijalnim modelom u *Abaqusu*.

Tablica 1. Svojstva CF283 T700 EF455 dobivena iz statičkih testova

ρ , kgmm ⁻³	E_1 , GPa	E_2 , GPa	ν_{12} , -	G_{12} , GPa	G_{23} , GPa	G_{31} , GPa
$1,559 \cdot 10^{-6}$	56	55,9	0,06	3,93	3,93	3,93

Tablica 2. Vlačna svojstva CF283 T700 EF455 dobivena procesom korelacije

	Opće ponašanje
$\sigma_{1y}^t, \sigma_{2y}^t$, GPa	0,94
$\sigma_{1max}^t, \sigma_{2max}^t$, GPa	0,941
$\varepsilon_{t1}, \varepsilon_{t2}$, -	0,0175
$\varepsilon_{m1}, \varepsilon_{m2}$, -	0,026
$\varepsilon_{f1}, \varepsilon_{f2}$, -	0,04

Tablica 3. Tlačna svojstva CF283 T700 EF455 dobivena procesom korelacije

	Opće ponašanje
$\sigma_{1y}^c, \sigma_{2y}^c$, GPa	0,3
$\sigma_{1max}^c, \sigma_{2max}^c$, GPa	0,75
$\sigma_{1rs}^c, \sigma_{2rs}^c$, GPa	0,31
$\varepsilon_1^{c1}, \varepsilon_2^{c1}$, -	0,021
$\varepsilon_1^{c2}, \varepsilon_2^{c2}$, -	0,033
b_1^c, b_2^c , -	15
n_1^c, n_2^c , -	0,41
$W_{1p}^{maxc}, W_{2p}^{maxc}$, Jmm ⁻³	0,017

Tablica 4. Smična svojstva CF283 T700 EF455 dobivena procesom korelacije

	Opće ponašanje
σ_{12y} , GPa	0,025
σ_{12max} , GPa	0,072
σ_{12rs} , GPa	0,026
ε_{12}^1 , -	0,122
ε_{12}^2 , -	0,16
b_{12} , -	2,8
n_{12} , -	0,1
W_{12}^{max} , Jmm ⁻³	0,03

U tablicama od 1 do 4 oznake su:

- ρ - gustoća materijala,
- E_1, E_2 - modul elastičnosti u smjerovima 1 i 2,
- ν_{12} - *Poissonov* faktor u ravnini 12,
- G_{12}, G_{23}, G_{31} - modul smičnosti u ravninama 12, 23 i 31,
- $\sigma_{1y}^t, \sigma_{2y}^t$ - vlačno naprezanje u smjerovima 1 i 2 nakon kojeg se materijal prestaje ponašati elastično,
- $\sigma_{1\max}^t, \sigma_{2\max}^t$ - maksimalno vlačno naprezanje u smjerovima 1 i 2,
- $\varepsilon_{t1}, \varepsilon_{t2}$ - vrijednost vlačne deformacije u smjerovima 1 i 2 nakon koje se naprezanje počinje smanjivati,
- $\varepsilon_{m1}, \varepsilon_{m2}$ - maksimalna vlačna deformacija u smjerovima 1 i 2 prilikom koje naprezanje ima vrijednost ovisnu o parametru oštećenja d_{\max} ,
- $\varepsilon_{f1}, \varepsilon_{f2}$ - maksimalna vlačna deformacija u smjerovima 1 i 2 prilikom koje nastupa brisanje elementa,
- $\sigma_{1y}^c, \sigma_{2y}^c$ - tlačno naprezanje u smjerovima 1 i 2 nakon kojeg se materijal prestaje ponašati elastično,
- $\sigma_{1\max}^c, \sigma_{2\max}^c$ - maksimalno tlačno naprezanje u smjerovima 1 i 2,
- $\sigma_{1rs}^c, \sigma_{2rs}^c$ - zaostalo tlačno naprezanje u smjerovima 1 i 2,
- $\varepsilon_1^{c1}, \varepsilon_2^{c1}$ - inicijalna tlačna deformacija u smjerovima 1 i 2 prilikom koje počinje popuštanje materijala,
- $\varepsilon_1^{c2}, \varepsilon_2^{c2}$ - maksimalna tlačna deformacija u smjerovima 1 i 2 za popuštanje materijala,
- b_1^c, b_2^c - parametar tlačnog plastičnog očvrnuća u smjerovima 1 i 2,
- n_1^c, n_2^c - eksponent tlačnog plastičnog očvrnuća u smjerovima 1 i 2,
- $W_{1p}^{\max}, W_{2p}^{\max}$ - maksimalni plastični rad po jedinici volumena elementa uslijed tlačnog opterećenja u smjerovima 1 i 2,
- σ_{12y} - smično naprezanje nakon kojeg se materijal prestaje ponašati elastično,
- $\sigma_{12\max}$ - maksimalno smično naprezanje,
- σ_{12rs} - zaostalo smično naprezanje,
- ε_{12}^1 - inicijalna kutna deformacija prilikom koje počinje popuštanje materijala,
- ε_{12}^2 - maksimalna kutna deformacija za popuštanje materijala,
- b_{12} - parametar smičnog plastičnog očvrnuća,
- n_{12} - eksponent smičnog plastičnog očvrnuća,
- W_{12}^{\max} - maksimalni plastični rad po jedinici volumena elementa uslijed smičnog opterećenja.

Materijalne kartice su opisane koristeći materijalni model *Law25 (CRASURV)* koji ima karakteristike ortotropno elastičnog materijala sve do postizanja *Tsai-Wu* kriterija nakon čega se počinje ponašati nelinearno. *CRASURV* formulacija predstavlja *Tsai-Wu* kriterij čiji su parametri ovisni o plastičnom radu (W_p^*) kao i o brzini deformiranja ($\dot{\epsilon}$) pa krivulja popuštanja ima oblik:

$$F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\sigma_6^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 < 1, \quad (12)$$

gdje su parametri:

$$F_i(W_p^*, \dot{\epsilon}) = -\frac{1}{\sigma_i^c(W_p^*, \dot{\epsilon})} + \frac{1}{\sigma_i^t(W_p^*, \dot{\epsilon})}, \quad (13)$$

$$F_{ii}(W_p^*, \dot{\epsilon}) = \frac{1}{\sigma_i^c(W_p^*, \dot{\epsilon}) \cdot \sigma_i^t(W_p^*, \dot{\epsilon})}, \quad (14)$$

$$F_{12}(W_p^*, \dot{\epsilon}) = -\frac{\alpha}{2} \sqrt{F_{11}(W_p^*, \dot{\epsilon}) \cdot F_{22}(W_p^*, \dot{\epsilon})}, \quad (15)$$

$$F_{66}(W_p^*, \dot{\epsilon}) = \frac{1}{\sigma_{12}(W_p^*, \dot{\epsilon}) \cdot \sigma_{12}(W_p^*, \dot{\epsilon})}, \quad (16)$$

pri čemu α predstavlja faktor redukcije F_{12} parametra (ovdje: $\alpha = 1$), a $i = 1$ ili 2 .

Važno je naglasiti da se u prethodnim jednadžbama uzima apsolutna vrijednost tlačne čvrstoće. Vrijednosti graničnih naprezanja kada se materijal počinje ponašati nelinearno u smjerovima 1, 2 i 12 imaju oblik:

- Za vlak

$$\sigma_i^t(W_p^*, \dot{\epsilon}) = \sigma_{iy}^t (1 + b_i^t (W_p^*)^{n_i^t}) \left(1 + c_i^t \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right), \quad (17)$$

- Za tlak

$$\sigma_i^c(W_p^*, \dot{\epsilon}) = \sigma_{iy}^c (1 + b_i^c (W_p^*)^{n_i^c}) \left(1 + c_i^c \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right), \quad (18)$$

- Za smik

$$\sigma_{12}(W_p^*, \dot{\epsilon}) = \sigma_{12y} (1 + b_{12} (W_p^*)^{n_{12}}) \left(1 + c_{12} \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right), \quad (19)$$

pri čemu je $i = 1$ ili 2 .

U gornjim jednadžbama za W_p^* vrijedi:

$$W_p^* = \frac{W_p}{W_p^{\text{ref}}}, \quad (20)$$

pri čemu je W_p plastični, a W_p^{ref} referentni plastični rad.

Generalno, inicijacija i propagacija oštećenja uslijed vlačnih deformacija kontrolira se faktorom d_i između ε_{ti} i ε_{fi} izrazom:

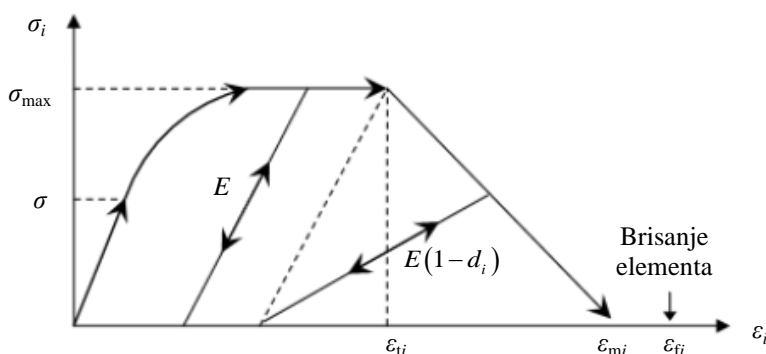
$$d_i = \min\left(\frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{ti}}{\varepsilon_i} \cdot \frac{\varepsilon_{mi}}{\varepsilon_{mi} - \varepsilon_{ti}}, d_{\max}\right), \quad (21)$$

a naprezanje se reducira s obzirom na faktor oštećenja:

$$\sigma_i^{\text{red}} = \sigma_i (1 - d_i), \quad (22)$$

pri čemu je $i = 1$ ili 2 .

Kada ε_i postigne vrijednost veću od ε_{fi} parametar oštećenja poprima vrijednost d_{\max} nakon čega nastupa brisanje elementa kao što je prikazano na slici 14.



Slika 14. Inicijacija i propagacija oštećenja [17]

Inicijacija i propagacija oštećenja uslijed tlačnih deformacija kontrolira se parametrima ε_i^{c1} i ε_i^{c2} dok se uslijed kutnih deformacija kontrolira parametrima ε_{12}^1 i ε_{12}^2 , ali se u odnosu na generalnu propagaciju oštećenja uslijed vlačnih deformacija element ne briše.

Brisanje elemenata uslijed tlačnog i smičnog opterećenja vrši se s obzirom na plastični rad, tj. element se briše ako se zadovolje sljedeći uvjeti:

- Za tlak

$$W_p^* > \min(W_{ip}^{\max*c}, W_p^{\max*}) \text{ ili } \sigma_i > \sigma_{iy}^c,$$

- Za smik

$$W_p^* > \min(W_{12p}^{\max*}, W_p^{\max*}) \text{ ili } \sigma_{12} > \sigma_{12y},$$

pri čemu je $i = 1$ ili 2 .

U gornjim jednadžbama za $W_{ip}^{\max*c}$, $W_{12p}^{\max*}$ i $W_p^{\max*}$ vrijedi:

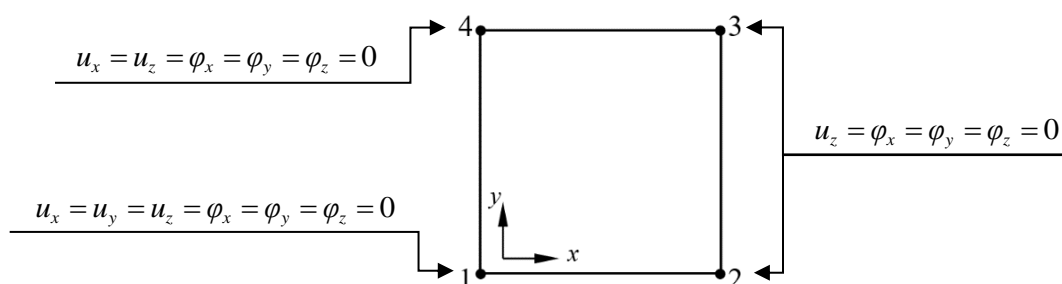
$$W_{ip}^{\max*c} = \frac{W_p^{\max}}{W_p^{\text{ref}}}, \quad (23)$$

$$W_{12p}^{\max*} = \frac{W_{12p}^{\max}}{W_p^{\text{ref}}}, \quad (24)$$

$$W_p^{\max*} = \frac{W_p^{\max}}{W_p^{\text{ref}}}, \quad (25)$$

pri čemu je W_p^{\max} generalni iznos maksimalnog plastičnog rada neovisan o vrsti opterećenja.

Kako bi se iznesena teorija lakše predočila, proveden je test na jednom ljuskastom elementu dimenzija $10 \times 10 \times 1 \text{ mm}^3$ za tri različite orijentacije: 0° , 90° i 45° i dva različita načina deformiranja: vlačno i tlačno s rubnim uvjetima definiranim prema slici 15. U čvorovima 2 i 3 nametnut je pomak u ovisnosti o vremenu u pozitivnom smjeru osi x kako bi se simulirao vlak te u negativnom smjeru za simulaciju tlaka.



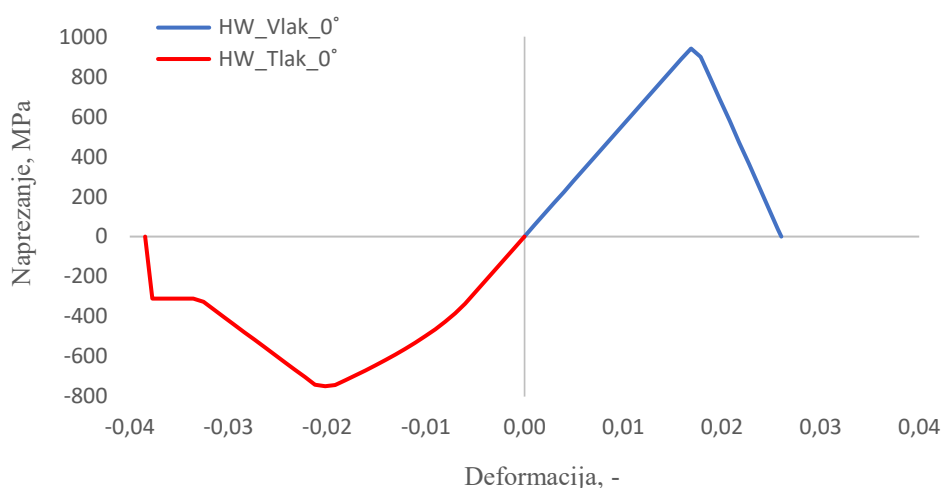
Slika 15. Test na jednom elementu

Na slici 16 je prikazan dijagram ovisnosti naprezanja i deformacija u smjeru deformiranja (x) za orijentaciju pod 0° i materijalnu karticu za opisivanje općeg ponašanja dobiven uz pomoć prethodno objašnjenog testa kojim se lako kontrolira ponašanje materijala kao i inicijacija i propagacija oštećenja prilikom vlačnog i tlačnog naprezanja.

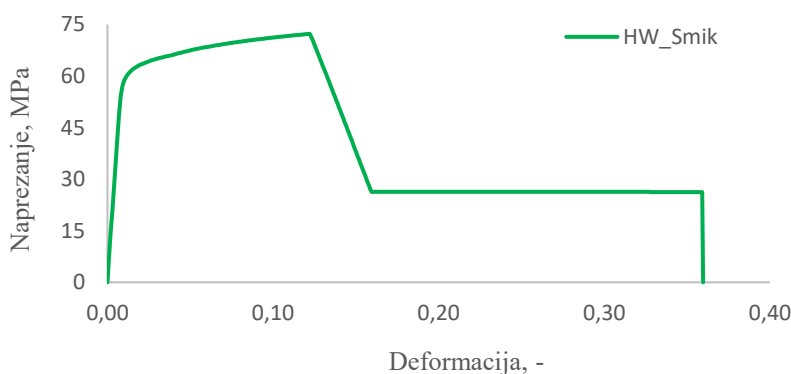
Za orijentaciju pod 90° dijagram se neznatno razlikuje s obzirom na to da se radi o tkanom (*eng. woven*) kompozitu koji teoretski ima identična svojstva u smjerovima 1 i 2.

Na slici 17 se nalazi dijagram ovisnosti naprezanja i deformacija dobiven razvlačenjem elementa s rasporedom slojeva $[45/-45/-45/45]$ u uzdužnom smjeru (x) kako bi se na taj način simulirao izgled krivulje za smik korišten unutar materijalne kartice za opisivanje općeg ponašanja pri čemu je vrijednost naprezanja transformirana u materijalni koordinatni sustav korištenjem izraza (81) iz [6]:

$$\sigma_{12} = \sigma_6 = -\sigma_x \sin \theta \cos \theta. \quad (26)$$



Slika 16. Dijagram napreznosti-deformacija za vlak i tlak



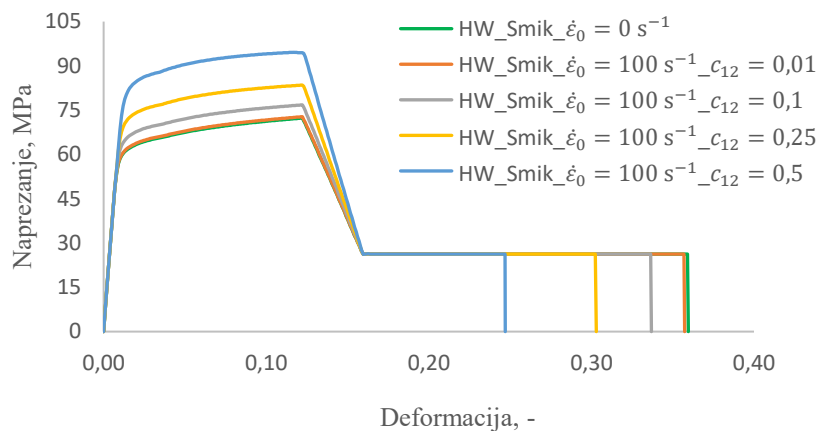
Slika 17. Dijagram napreznosti-deformacija za smik

Važno je naglasiti da je u ovom slučaju na slici 17 prikazana tenzorska (ε_{12}), a ne inženjerska (γ_{12}) kutna deformacija.

Također, potrebno je naglasiti da u materijalnim karticama iako spomenuta (u jednadžbama od 17 do 19), brzina deformacije nije uzeta u obzir. Nadalje, razmatranjem slika 16 i 17 može se primijetiti kako je kod smičnog ponašanja nelinearnost najviše izražena i kako bi se utjecaj brzine deformacije na tako definiranom ponašanju najviše uočio. Shodno tome, na slici 18 je prikazan utjecaj referentne brzine deformacije ($\dot{\varepsilon}_0$) od 100 s^{-1} na definirano smično ponašanje uz različite koeficijente brzine deformacije (c_{12}) kako bi se na taj način osim same brzine deformacije, prikazao i utjecaj spomenutog koeficijenta iz jednadžbe 19 na konstitutivno ponašanje modela.

Uspoređujući krivulje na slici 18 može se primijetiti da se izostavljanjem brzine deformacije, odnosno iščezavanjem druge zagrade u jednadžbi 19 postiže konzervativniji model s obzirom

na to da pod utjecajem brzine deformacije krivulja σ - ε dijagrama poprima drugačiji oblik i dozvoljava veću vrijednost napreznja za istu vrijednost deformacije.



Slika 18. Utjecaj brzine deformacije na σ - ε dijagram

3.2. Abaqus

3.2.1. Hashinov kriterij [18]

Hashinov kriterij popuštanja namijenjen je za jednosmjerne kompozite s pretpostavkom ravninskog stanja napreznja, a razlikuje četiri načina popuštanja:

- 1) Vlačno popuštanje vlakana pri čemu je $\hat{\sigma}_{11} \geq 0$:

$$F_f^t = \left(\frac{\hat{\sigma}_{11}}{X^T} \right)^2 + \alpha \left(\frac{\hat{\tau}_{12}}{S^L} \right)^2, \quad (27)$$

- 2) Tlačno popuštanje vlakana pri čemu je $\hat{\sigma}_{11} < 0$:

$$F_f^c = \left(\frac{\hat{\sigma}_{11}}{X^C} \right)^2, \quad (28)$$

- 3) Vlačno popuštanje matrice pri čemu je $\hat{\sigma}_{22} \geq 0$:

$$F_m^t = \left(\frac{\hat{\sigma}_{22}}{Y^T} \right)^2 + \left(\frac{\hat{\tau}_{12}}{S^L} \right)^2, \quad (29)$$

- 4) Tlačno popuštanje matrice pri čemu je $\hat{\sigma}_{22} < 0$:

$$F_m^c = \left(\frac{\hat{\sigma}_{22}}{2S^T} \right)^2 + \left[\left(\frac{Y^C}{2S^T} \right)^2 - 1 \right] \frac{\hat{\sigma}_{22}}{Y^C} + \left(\frac{\hat{\tau}_{12}}{S^L} \right)^2. \quad (30)$$

Inicijacija popuštanja vlakana javlja se u slučaju ako F_f^t ili F_f^c postane veće od jedan, dok popuštanje matrice nastupa ukoliko je iznos F_m^t ili F_m^c veći od jedan.

U jednadžbama od 27 do 30 oznake su:

X^T, X^C - vlačna (T) i tlačna (C) čvrstoća u smjeru vlakana, tj. longitudinalnom smjeru (L),

Y^T, Y^C - vlačna (T) i tlačna (C) čvrstoća u smjeru okomitom na pružanje vlakana, tj. transverzalnom (T) smjeru,

S^L, S^T - smična čvrstoća u longitudinalnom (L) i transverzalnom (T) smjeru,

α - parametar kojim se određuje utjecaj posmičnih naprezanja u nastajanju oštećenja vlakana pri vlačnom opterećenju (ovdje: $\alpha = 1$),

$\hat{\sigma}_{11}, \hat{\sigma}_{22}, \hat{\tau}_{12}$ - komponente efektivnog tenzora naprezanja $\hat{\boldsymbol{\sigma}}$.

Konstitutivna relacija prema kojoj se određuje odziv, odnosno naprezanje ortotropnog materijala, uz pretpostavku ravninskog stanja naprezanja, jest:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C}_d \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (31)$$

gdje \mathbf{C}_d označava matricu elastičnosti konačnog elementa u kojoj su parametri oštećenja uzeti u obzir:

$$\mathbf{C}_d = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} (1-d_f)E_1 & (1-d_f)(1-d_m)v_{21}E_1 & 0 \\ (1-d_f)(1-d_m)v_{12}E_2 & (1-d_m)E_2 & 0 \\ 0 & 0 & (1-d_s)GD \end{bmatrix}, \quad (32)$$

gdje je parametar D definiran kao:

$$D = 1 - (1-d_f)(1-d_m)v_{12}v_{21}. \quad (33)$$

Oznake u prethodnim jednadžbama su:

d_f - parametar oštećenja vlakana,

d_m - parametar oštećenja matrice,

d_s - parametar posmičnog oštećenja.

Stanje naprezanja u materijalu nakon pojave oštećenja određeno je pomoću relacije:

$$\hat{\boldsymbol{\sigma}} = \mathbf{M} \boldsymbol{\sigma}, \quad (34)$$

gdje je $\boldsymbol{\sigma}$ nominalno naprezanje, a \mathbf{M} operator oštećenja:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} (1-d_f)^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & (1-d_m)^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & (1-d_s)^{-1} \end{bmatrix}. \quad (35)$$

Dok je materijal u neoštećenom stanju, matrica operatora oštećenja je jedinična pa se izraz (34) može zapisati kao:

$$\hat{\boldsymbol{\sigma}} = \boldsymbol{\sigma}. \quad (36)$$

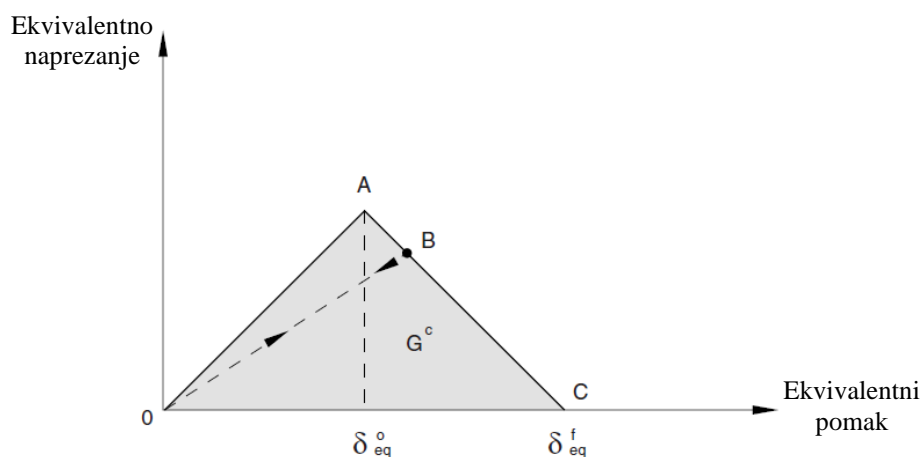
Iznosi spomenutih parametara oštećenja ovise o načinu opterećenja pa vrijedi:

$$d_f = \begin{cases} d_f^t & \text{za } \hat{\sigma}_{11} \geq 0, \\ d_f^c & \text{za } \hat{\sigma}_{11} < 0, \end{cases} \quad (37)$$

$$d_m = \begin{cases} d_m^t & \text{za } \hat{\sigma}_{22} \geq 0, \\ d_m^c & \text{za } \hat{\sigma}_{22} < 0, \end{cases} \quad (38)$$

$$d_s = 1 - (1 - d_f^t)(1 - d_f^c)(1 - d_m^t)(1 - d_m^c). \quad (39)$$

Na slici 19 prikazan je dijagram ovisnosti ekvivalentnog naprezanja o ekvivalentnom pomaku pri čemu je moguće uočiti kako se materijal ponaša linearno elastično sve do trenutka pojave oštećenja nakon čega vrijednost ekvivalentnog naprezanja u materijalu počinje opadati. Zakon opadanja vrijednosti ekvivalentnog naprezanja nakon pojave oštećenja predstavlja pravac negativnog nagiba, a površina ispod trokutaste krivulje dijagrama predstavlja vrijednost energije utrošene za potpuno popuštanje materijala.



Slika 19. Dijagram ovisnosti ekvivalentnog naprezanja i ekvivalentnog pomaka [18]

Opisivanje krivulje negativnog nagiba postiže se pomoću parametara oštećenja za određeni način popuštanja koji se definiraju na temelju ekvivalentnih pomaka:

$$d = \frac{\delta_{eq}^f (\delta_{eq} - \delta_{eq}^0)}{\delta_{eq} (\delta_{eq}^f - \delta_{eq}^0)}, \quad (40)$$

gdje je δ_{eq}^0 pomak pri kojem se oštećenje inicira, a δ_{eq}^f pomak pri kojemu se javlja potpuno popuštanje sloja prema bilo kojem kriteriju popuštanja.

Vrijednost δ_{eq}^0 za različite načine inicijacije i popuštanja ovisi o elastičnoj krutosti i čvrstoći dok se vrijednost δ_{eq}^f dobiva iz energije utrošene na popuštanje G^c (eng. *Fracture energy*) koja odgovara površini OAC trokuta na slici 19.

Ekvivalentni pomak i ekvivalentno naprezanje u ovisnosti o načinu popuštanja su:

1) Vlačno opterećenje vlakana ($\hat{\sigma}_{11} \geq 0$):

$$\delta_{\text{eq}}^{\text{ft}} = L^C \sqrt{\langle \varepsilon_{11} \rangle^2 + \alpha \varepsilon_{12}^2}, \quad (41)$$

$$\sigma_{\text{eq}}^{\text{ft}} = \frac{\langle \sigma_{11} \rangle \langle \varepsilon_{11} \rangle + \alpha \tau_{12} \varepsilon_{12}}{\frac{\delta_{\text{eq}}^{\text{ft}}}{L^C}}, \quad (42)$$

2) Tlačno opterećenje vlakana ($\hat{\sigma}_{11} < 0$):

$$\delta_{\text{eq}}^{\text{fc}} = L^C \langle -\varepsilon_{11} \rangle, \quad (43)$$

$$\sigma_{\text{eq}}^{\text{fc}} = \frac{\langle -\sigma_{11} \rangle \langle -\varepsilon_{11} \rangle}{\frac{\delta_{\text{eq}}^{\text{fc}}}{L^C}}, \quad (44)$$

3) Vlačno opterećenje matrice ($\hat{\sigma}_{22} \geq 0$):

$$\delta_{\text{eq}}^{\text{mt}} = L^C \sqrt{\langle \varepsilon_{22} \rangle^2 + \varepsilon_{12}^2}, \quad (45)$$

$$\sigma_{\text{eq}}^{\text{mt}} = \frac{\langle \sigma_{22} \rangle \langle \varepsilon_{22} \rangle + \tau_{12} \varepsilon_{12}}{\frac{\delta_{\text{eq}}^{\text{mt}}}{L^C}}, \quad (46)$$

4) Tlačno opterećenje matrice ($\hat{\sigma}_{22} < 0$):

$$\delta_{\text{eq}}^{\text{mc}} = L^C \sqrt{\langle -\varepsilon_{22} \rangle^2 + \varepsilon_{12}^2}, \quad (47)$$

$$\sigma_{\text{eq}}^{\text{mc}} = \frac{\langle -\sigma_{22} \rangle \langle -\varepsilon_{22} \rangle + \tau_{12} \varepsilon_{12}}{\frac{\delta_{\text{eq}}^{\text{mc}}}{L^C}}. \quad (48)$$

U prethodnim jednadžbama parametar L^C označava karakterističnu duljinu konačnog elementa ovisnu o njegovoj geometriji. Nadalje, u istim se jednadžbama koristi i simbol $\langle \rangle$, koji predstavlja *Macaulayev* operator definiran prema izrazu:

$$\langle \alpha \rangle = \frac{\alpha + |\alpha|}{2}. \quad (49)$$

Prema *Hashinovom* kriteriju, popuštanje konačnog elementa nastupa u slučaju kada svi slojevi kompozita popuste po bilo kojem načinu popuštanja pri čemu *Abaqus/Explicit* element uklanja iz mreže samo ako se popuštanje odnosi na vlačno ili tlačno popuštanje vlakana pri čemu se kriteriji popuštanja kontroliraju putem slijedećih varijabli:

- HSNFTCRT - inicijacija vlačnog popuštanja vlakana,
- HSNFCCRT - inicijacija tlačnog popuštanja vlakana,
- HSNMTCRT - inicijacija vlačnog popuštanja matrice,
- HSNMCCRT - inicijacija tlačnog popuštanja matrice.

Do inicijacije oštećenja dolazi kada je iznos nekog od iznad navedenih kriterija zadovoljen, tj. kada je iznos jednak ili veći od 1.

Nadalje, ako se u svojstvima materijala prilikom definiranja *Hashin*ovog kriterija definira i opcija propagacije oštećenja (*eng. Damage evolution*), tada maksimalan iznos spomenutih varijabli iznosi 1 i ne prijelazi navedenu vrijednost, u suprotnom maksimalan iznos kriterija pojavom popuštanja iznosi više od 1 i apelira na prekoračenje kriterija. Propagacija oštećenja kontrolira se putem slijedećih varijabli čiji se raspon također kreće od 0 do 1:

- DAMAGEFT - vlačno oštećenje vlakana,
- DAMAGEFC - tlačno oštećenje vlakana,
- DAMAGEMT - vlačno oštećenje matrice,
- DAMAGEMC - tlačno oštećenje matrice,
- DAMAGESHR - posmično oštećenje.

3.2.2. Materijalna kartica u Abaqusu

Uz pomoć programskog paketa *Abaqus/Explicit* te materijalnih karakteristika dobivenih iz eksperimentalnih testova kao i u potpoglavlju 3.1 opisanog numeričkog programskog paketa [17], formirani su materijalni modeli za opisivanje općeg ponašanja, apsorbera „otvorenog“ i „zatvorenog“ profila. U spomenutim materijalnim karticama koristi se *Hashin*ov kriterij popuštanja s obzirom na to da u *Abaqusu* jedini ima implementirani model inicijacije i propagacije oštećenja. Nadalje, kako je *Hashin*ov kriterij namijenjen za jednosmjerne kompozite za koje u ovom radu ne postoje eksperimentalni rezultati kao ni svojstva, isti su preuzeti iz dostupne literature [19] te korigirani s obzirom na volumni udio vlakana u tkanom kompozitu. Također, važno je naglasiti da je pregledom literature za jednosmjerni kompozit bilo teško pronaći identičnu kombinaciju matrice i vlakana kao kod postojećeg tkanog kompozita zbog čega je koristeći test na jednom elementu proveden postupak korelacije, a promijenjeni parametri posebno su naznačeni u tablici 5.

U tablici 5 su ispisana svojstva tkanog W (*eng. woven*) i jednosmjernog UD kompozita (*eng. unidirectional*) korištena za opisivanje općeg ponašanja.

Tablica 5. Svojstva tkanog i jednosmjernog kompozita korištena u Abaqusu

	W CF283 T700 EF455	UD T700/epoxy [19]*
ρ , kgm ⁻³	1559	1570
E_1 , MPa	56000	110000
E_2 , MPa	55900	8580
ν_{12} , -	0,06	0,208
G_{12} , MPa	3930	5420
G_{23} , MPa	3930	3260
G_{31} , MPa	3930	5420
X_T , MPa	941	1900**
Y_T , MPa	941	1400**
X_C , MPa	750	20
Y_C , MPa	750	110
S , MPa	72	62,5

*Svojstva iz literature preračunata s obzirom na stvarni volumen vlakana u korištenom modelu

$$\text{koristeći sljedeći izraz: } XY_{\text{model}} = \frac{V_{f,\text{model}}}{V_{f,\text{literatura}}} XY_{\text{literatura}}$$

** Svojstva iz literature korelirana s obzirom na postojeća svojstva za tkani kompozit.

U tablici 6 su ispisane vrijednosti energije utrošene na popuštanje tkanog kompozita čime je definirana propagacija oštećenja pri čemu su u smjerovima 1 i 2 vrijednosti identične iako se u Hashinovom kriteriju definiraju i razlikuju kao popuštanje vlakana i matrice.

Tablica 6. Energija utrošena na popuštanje tkanog kompozita za opće ponašanje

	W CF283 T700 EF455
G_{ft}^c , Nmm ⁻¹	127,6
G_{fc}^c , Nmm ⁻¹	174,6
G_{mt}^c , Nmm ⁻¹	127,6
G_{mc}^c , Nmm ⁻¹	174,6

U tablici 6 oznake su:

- G_{ft}^c , G_{fc}^c - Vrijednost energije utrošene na vlačno (t) i tlačno (c) popuštanje vlakana,
 G_{mt}^c , G_{mc}^c - Vrijednost energije utrošene na vlačno (t) i tlačno (c) popuštanje matrice,

S obzirom na to da je u [18] definirano, a na slici 19 prikazano da vrijednost energije utrošene na popuštanje diktira površinu ispod dijagrama ekvivalentnog naprezanja i pomaka, vrijednosti istih za tkani kompozit dobivene su izračunavanjem površine ispod σ - u dijagrama dobivenog testom na jednom elementu unutar programskog paketa *HyperWorks* čime se prema jednadžbama od (41) do (48) zanemario utjecaj posmičnih deformacija. Tako npr. za vlačno opterećenje vlakana, odnosno za vlačno opterećenje u smjeru 1 materijalnog koordinatnog sustava s obzirom na to da se radi o tkanom kompozitu, vrijedi:

$$\delta_{eq}^{ft} \approx L^C \langle \varepsilon_{11} \rangle, \quad (50)$$

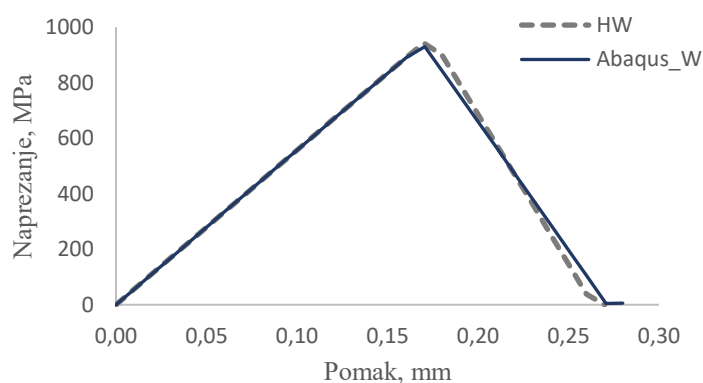
$$\sigma_{eq}^{ft} \approx \frac{\langle \sigma_{11} \rangle \langle \varepsilon_{11} \rangle}{\frac{\delta_{eq}^{ft}}{L^C}}. \quad (51)$$

Uvrštavanjem izraza (50) u (51) slijedi:

$$\sigma_{eq}^{ft} \approx \langle \sigma_{11} \rangle. \quad (52)$$

Kako bi se iznesena teorija lakše predočila, test na jednom ljuskastom elementu proveden je i u *Abaqusu* pri čemu su dimenzije, orijentacija, rubni uvjeti kao i postavke analize narinute kao i u *HyperWorksu* što je pobliže objašnjeno u potpoglavlju 3.1.

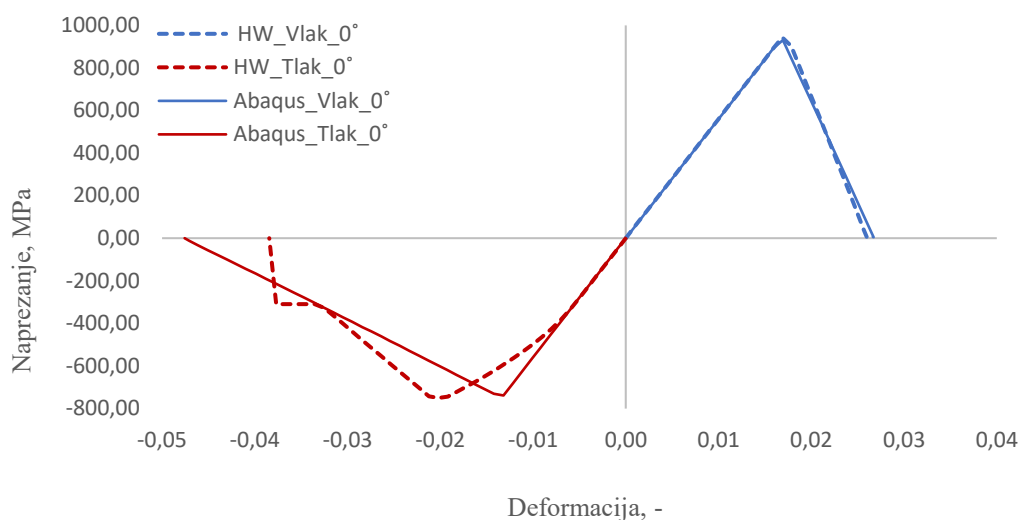
Krivulja naprezanje-pomak za vlačno opterećenje u smjeru 1 dobivena testom na jednom elementu u *HyperWorksu* kao i usporedba s istom krivuljom dobivenom na isti način u *Abaqusu* prikazane su na slici 20.



Slika 20. Usporedba σ - u krivulja dobivenih u *HyperWorksu* i *Abaqusu*

Analogno je izračunata vrijednost energije utrošene na tlačno popuštanje vlakana, tj. tlačno popuštanje u smjeru 1, dok su za energiju utrošenu na vlačno i tlačno popuštanje u smjeru 2 uzete iste vrijednosti kao u smjeru 1 s obzirom na to da se radi o tkanom kompozitu zbog čega vrijednosti ne bi trebale pretjerano odstupati.

Na slici 21 prikazan je σ - ε dijagram dobiven za tkani kompozit u *Abaqusu* te usporedba u odnosu na isti dijagram dobiven u *HyperWorksu*.



Slika 21. Usporedba σ - ε dijagrama dobivenih u *HyperWorksu* i *Abaqusu*

Kako u *HyperWorksu* nije korišten materijalni model za jednosmjerni kompozit, energija utrošena na popuštanje istog izračunata je korištenjem sljedećeg pojednostavnjenja. Naime, kao što je već spomenuto, iznos energije uslijed popuštanja određuje površinu trokuta OAC na slici 19 zbog čega vrijedi:

$$G^c = \frac{\sigma_{eq}^0 \delta_{eq}^f}{2}, \quad (53)$$

gdje je σ_{eq}^0 iznos ekvivalentnog naprezanja prilikom kojeg se oštećenje inicira što je moguće izraziti korištenjem jednadžbi od (27) do (30) prilikom čega su F_f^t , F_f^c , F_m^t i F_m^c jednaki 1.

Uz zanemarivanje neznatnog utjecaja posmičnog naprezanja, slijedi približan iznos energije utrošene na tlačno popuštanje vlakana, tj. tlačno popuštanje u smjeru 1:

$$G_{ft}^c \approx \frac{X_T \delta_{eq}^{ft}}{2}. \quad (54)$$

S obzirom na to da se želi zadržati isti iznos ekvivalentnog pomaka u jednosmjernom i tkanom kompozitu pri čemu se jedan tkani sloj razmatra kao dva jednosmjerna s rasporedom slojeva [0/90], vrijede sljedeće relacije:

$$\frac{\delta_{eq}^{ft}}{2} \approx \left(\frac{G_{ft}^c}{X_T} \right)^W = 0,5 \left(\frac{G_{ft}^c}{X_T} + \frac{G_{mt}^c}{Y_T} \right)^{UD}, \quad (55)$$

$$(G_{ft}^c)^W = 0,5 (G_{ft}^c + G_{mt}^c)^{UD}. \quad (56)$$

Analogno su dobivene relacije za tlačno popuštanje u smjeru 1:

$$\frac{\delta_{eq}^{fc}}{2} \approx \left(\frac{G_{fc}^c}{X_C} \right)^W = 0,5 \left(\frac{G_{fc}^c}{X_C} + \frac{G_{mc}^c}{Y_C} \right)^{UD}, \quad (57)$$

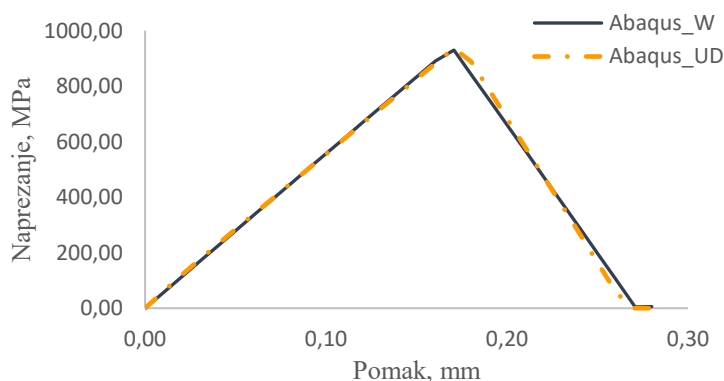
$$(G_{fc}^c)^W = 0,5 (G_{fc}^c + G_{mc}^c)^{UD}. \quad (58)$$

Vrijednosti energije utrošene na popuštanje dobivene rješavanjem prethodnih sustava jednadžbi ispisane su u tablici 7.

Tablica 7. Energija utrošena na popuštanje jednosmjernog kompozita za opće ponašanje

	UD T700/epoxy
$G_{ft}^c, \text{Nmm}^{-1}$	252,4
$G_{fc}^c, \text{Nmm}^{-1}$	323,4
$G_{mt}^c, \text{Nmm}^{-1}$	2,8
$G_{mc}^c, \text{Nmm}^{-1}$	25,8

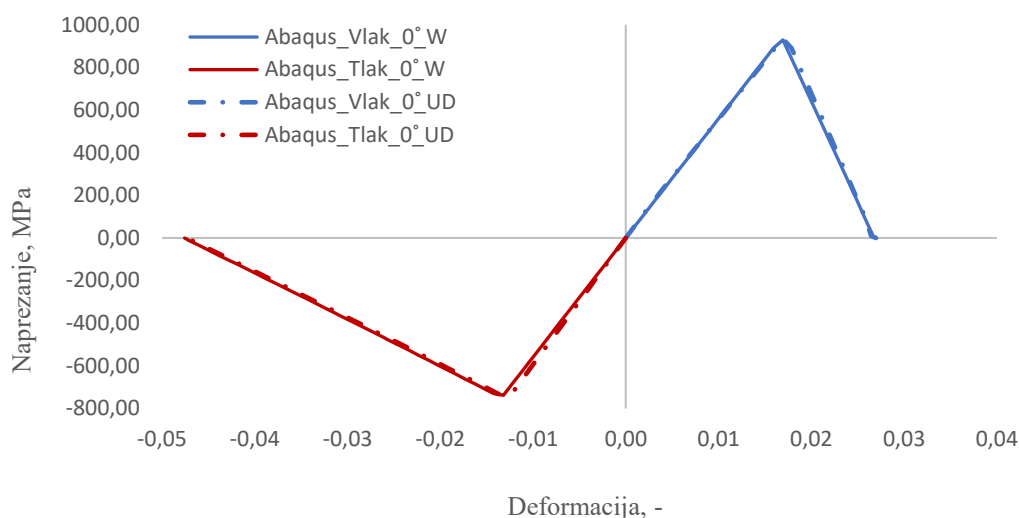
Na slici 22 prikazana je usporedba krivulja naprezanje-pomak za vlačno opterećenje u smjeru 1 dobivena testom na jednom elementu jednosmjernog (UD) i tkanog (W) kompozita u *Abaqusu*.



Slika 22. Usporedba σ - u krivulja dobivenih u *Abaqusu* za tkani i jednosmjerni kompozit

Na slici 23 nalazi se σ - ε dijagram za jednosmjerni (UD) te njegova usporedba s tkanim (W) kompozitom dobivenim testom na jednom elementu u *Abaqusu*.

Nadalje, s obzirom na to da za *Hashinov* kriterij popuštanja i inicijacije oštećenja u *Abaqusu* ne postoje parametri kojima bi se utjecalo na posmično oštećenje, nego je isto definirano uz pomoć parametara za oštećenje matrice i vlakana što se jasno vidi u jednadžbi (39) zbog čega nije provedena korelacija spomenutih svojstava pa nije priložen ni dijagram usporedbe.



Slika 23. Usporedba σ - ε dijagrama dobivenih u *Abaqusu* za jednosmjerni (UD) i tkani (W) kompozit

Na isti način proces korelacije proveden je i za materijalne kartice korištene za opisivanje apsorbera „otvorenog“ i „zatvorenog“ profila pri čemu su svojstva iz tablice 5 ostala ista dok se iznos energije utrošene na popuštanje mijenjao ovisno o ponašanju koje se želi opisati. Vrijednosti energije utrošene na popuštanje apsorbera „otvorenog“ profila za tkani i jednosmjerni kompozit ispisane su u tablici 8 dok su vrijednosti apsorbera „zatvorenog“ profila ispisane u tablici 9.

Tablica 8. Energija utrošena na popuštanje apsorbera „otvorenog“ profila

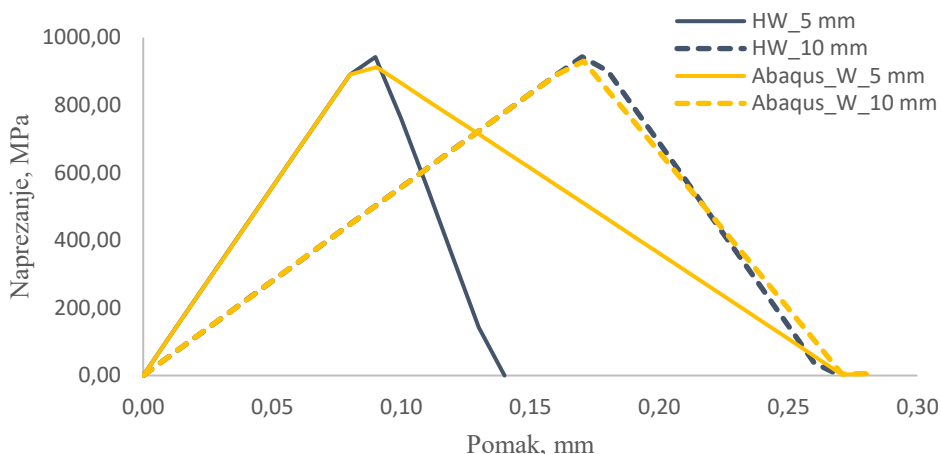
	W CF283 T700 EF455	UD T700/epoxy
G_{ft}^c , Nmm ⁻¹	135,3	267,7
G_{fc}^c , Nmm ⁻¹	270,3	500,6
G_{mt}^c , Nmm ⁻¹	135,3	2,9
G_{mc}^c , Nmm ⁻¹	270,3	40

Tablica 9. Energija utrošena na popuštanje apsorbera „zatvorenog“ profila

	W CF283 T700 EF455	UD T700/epoxy
G_{ft}^c , Nmm ⁻¹	180,4	356,9
G_{fc}^c , Nmm ⁻¹	809,4	1499,2
G_{mt}^c , Nmm ⁻¹	180,4	3,9
G_{mc}^c , Nmm ⁻¹	809,4	119,6

S obzirom na to da spomenuti programski paketi inicijaciju i propagaciju oštećenja opisuju na različite načine, analiza je napravljena i za element dimenzija $5 \times 5 \times 1 \text{ mm}^3$ kako bi se provjerio utjecaj veličine elementa na postojeći model oštećenja.

Na slici 24 prikazan je dijagram naprezanje-pomak za elemente dimenzija $5 \times 5 \times 1 \text{ mm}^3$ i $10 \times 10 \times 1 \text{ mm}^3$ dobiven testom na jednom elementu u *HyperWorksu* i *Abaqusu*.



Slika 24. Usporedba σ - u krivulja dobivenih u *Abaqusu* i *HyperWorksu* za različitu veličinu elementa

Na prethodnoj slici se jasno vidi kako za različitu veličinu elementa σ - u dijagram u *HyperWorksu* poprima drugačiji oblik, a samim time i drugačiju površinu ispod krivulje na dijagramu što je u ovom slučaju duplo manja površina za element čija je karakteristična duljina (L^C) duplo manja. Analogno tome, ako se materijalni model u *Abaqusu* korelira s obzirom na postojeći model u *HyperWorksu* potrebno je obratiti pažnju na iznos energije uslijed popuštanja. Ukoliko iznos energije uslijed popuštanja ostane isti, površina ispod krivulje u σ - u dijagramu u *Abaqusu* zadržava isti iznos kao što je i napomenuto prilikom objašnjenja materijalnog modela, a može se primijetiti i na slici 24.

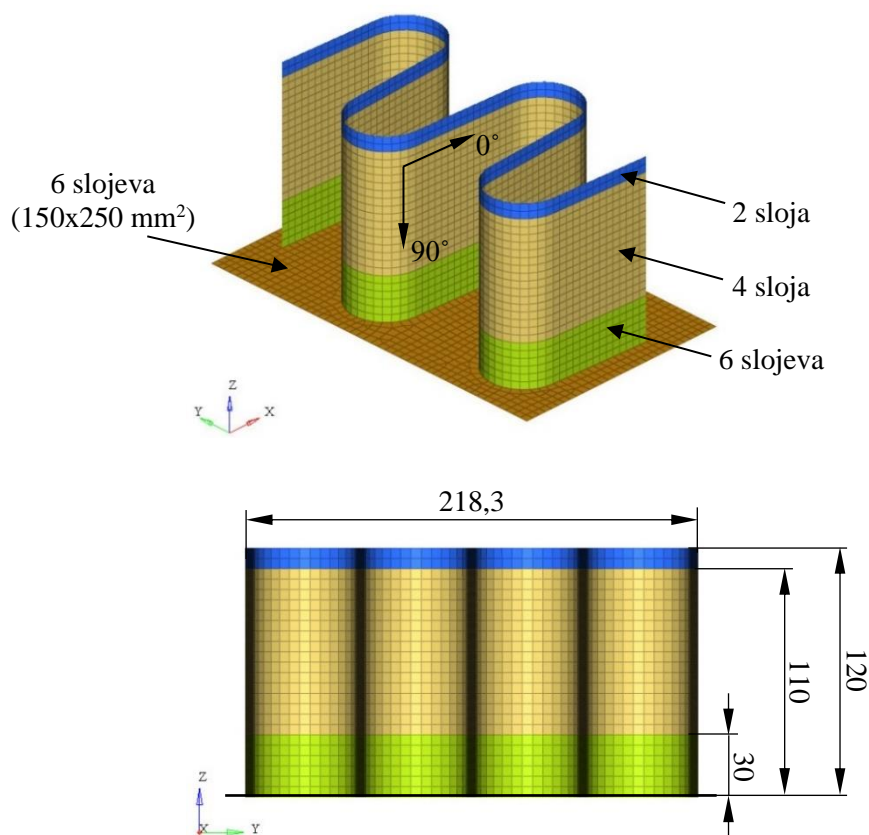
Kako će se u nastavku rada koristiti finija mreža od 5 mm, za iznos energije popuštanja uzet će se polovičan iznos prethodno definiranih vrijednosti kako bi usporedba programskih paketa imala veći smisao pri čemu je važno naglasiti da je objašnjeni postupak proveden jer u dostupnoj literaturi nije definirana energija utrošena na popuštanje, a nužna je za provođenje analize.

4. NUMERIČKO MODELIRANJE UDARNOG OPTEREĆENJA I VALIDACIJA S EKSPERIMENTALNIM REZULTATIMA

Numeričko modeliranje udarnog oštećenja izvršeno je na dva različita oblika apsorbera s obzirom na to da različite izvedbe konstrukcijskih komponenti utječu na sposobnost apsorbiranja energije zbog čega nije najtočnije uvijek koristiti isti numerički materijalni model kao što je i prethodno spomenuto. Osim numeričkih ispitivanja, na tako definiranim apsorberima provedena su i realna ispitivanja u *Body Safety & Homologation Test* laboratoriju u sklopu tvrtke CSI u Milanu (Italija), a rezultati su poslužili za korelaciju materijalnih kartica što će biti opisano u nastavku.

4.1. Apsorber „otvorenog“ profila

Na slici 25 prikazan je apsorber „otvorenog“ profila sinusoidalnog oblika. Na slici su označene promjene presjeka, pripadni broj slojeva CF283 T700 EF455 2x2 *Twill* debljine 0,32 mm kao i orijentacija materijalnog koordinatnog sustava.



Slika 25. Apsorber „otvorenog“ profila s dimenzijama u mm

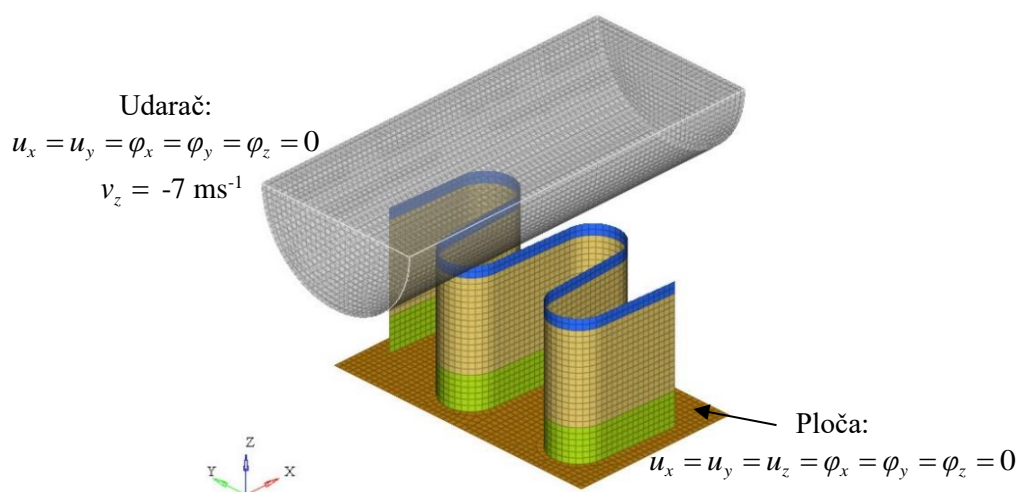
Plan laminacije za apsorber sa slike 25 ispisan je u tablici 10.

Tablica 10. Raspored slojeva apsorbera „otvorenog“ profila

	Orijentacija					
6 slojeva	0	45	0	0	45	0
4 sloja		0	45	45	0	
2 sloja			0	0		

Apsorber izrađen prema slici 25 je udarno opterećen udaračem hemisfernog oblika mase 18,059 kg koji je, provodeći tzv. *Drop test*, bačen s visine od približno 2,5 m čime je postignuta početna brzina udara od 7 ms^{-1} . Međutim, u numeričkim analizama nije simuliran pad s 2,5 m nego je udarač pozicioniran blizu apsorbera, a brzina od 7 ms^{-1} nametnuta je kao početni uvjet.

Koristeći u poglavlju 3 razrađene materijalne modele kao i spomenute programske pakete, provedena je nelinearna dinamička analiza s eksplicitnom vremenskom integracijom na numeričkom modelu prema slici 26 koji se sastoji od ukupno 10764 konačna elementa od čega 4596 pripada apsorberu. Ukupno simulirano vrijeme iznosi 25 ms.



Slika 26. Numerički model „otvorenog“ apsorbera u *HyperWorksu*

S obzirom na to da numerički model u *Abaqusu* izgleda identično, na slici 26 je prikazan samo model iz *HyperWorksa* dok će eventualne razlike između njih biti objašnjene u nastavku.

Naime, unutar programskog paketa *HyperWorks* čelični udarač modula elastičnosti 210 GPa i *Poissonovog* faktora 0,3 modeliran je Q4 ljuskastim elementima veličine 5 mm koje karakterizira reducirana integracija. Svi čvorovi tako modeliranog udarača povezani su 1D elementom, tzv. *Rigid Body* u čiju je referentnu točku zadan preostali iznos mase do 18,059 kg.

Također, u toj istoj referentnoj točki spriječeni su svi pomaci osim translacije u smjeru z te je zadana brzina od -7 ms^{-1} . Analogno je modeliran udarač unutar programskog paketa *Abaqus* pri čemu ljuskasti element reducirane integracije ima oznaku S4R.

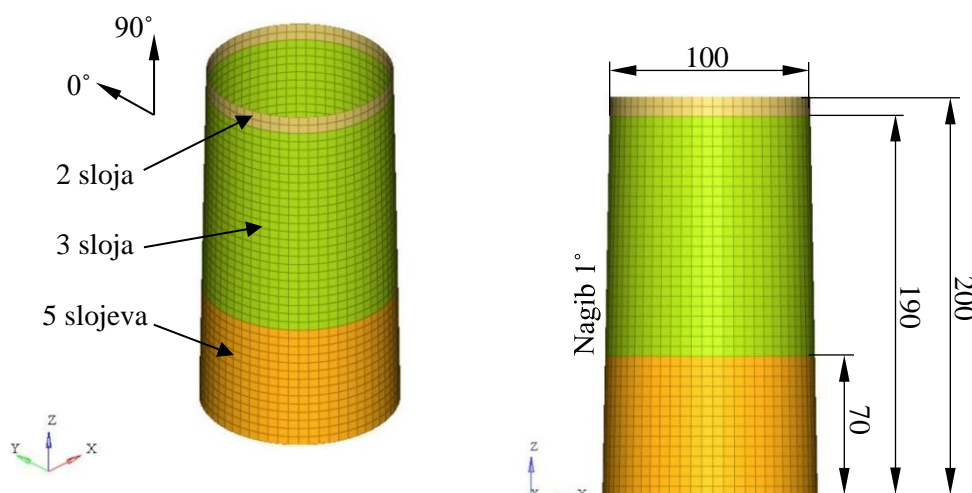
Nadalje, unutar *HyperWorks*a apsorber je modeliran korištenjem QBAT ljuskastih elemenata veličine 5 mm za čiju formulaciju se koristi potpuna integracija, a svojstva materijala navedena su u poglavlju 3. Analogno je modeliran apsorber unutar *Abaqusa* pri čemu ljuskasti element potpune integracije ima oznaku S4. Također, potrebno je naglasiti da element u *HyperWorksu* ima samo jednu točku integracije po debljini sloja laminata dok je u *Abaqusu* minimalan broj točaka integracije po debljini sloja 3. Shodno tome, svaki sloj u *HyperWorksu* podijeljen je na tri dijela kako bi se postigao jednak broj integracijskih točaka po debljini konačnog elementa u *HyperWorksu* i *Abaqusu*. Tako modeliran apsorber uklješten je na donjoj ploči prema slici 26.

Važno je napomenuti kako korišteni konačni elementi imaju po 4 čvora (nekolicina njih ima 3 čvora zbog boljeg opisivanja geometrije) pri čemu Q4 i QBAT u svakom od čvorova imaju po 5 stupnjeva slobode gibanja (translacije u x , y i z smjeru te rotacije oko x i y osi) dok elementi S4R i S4 u svakom od njih imaju po 6 stupnjeva slobode gibanja (sve translacije i rotacije).

Cjelokupnom modelu nametnut je i utjecaj gravitacije od $-9,81 \text{ ms}^{-2}$, a s obzirom na to da se među komponentama ostvaruje kontakt, unutar *HyperWorks*a zadan je *Type7* kontakt dok je u *Abaqusu* isti zadan unutar modula *Interaction* koristeći *Global contact (Explicit)* opciju s koeficijentom trenja 0,1 [20].

4.2. Apsorber „zatvorenog“ profila

Na slici 27 prikazan je apsorber „zatvorenog“ profila koji ima presjek kružnog vijenca.



Slika 27. Apsorber „zatvorenog“ profila s dimenzijama u mm

Na slici 27 su označene promjene presjeka, pripadni broj slojeva CF283 T700 EF455 2x2 *Twill* kompozita debljine 0,32 mm te orijentacija materijalnog koordinatnog sustava dok je plan laminacije ispisan u tablici 11.

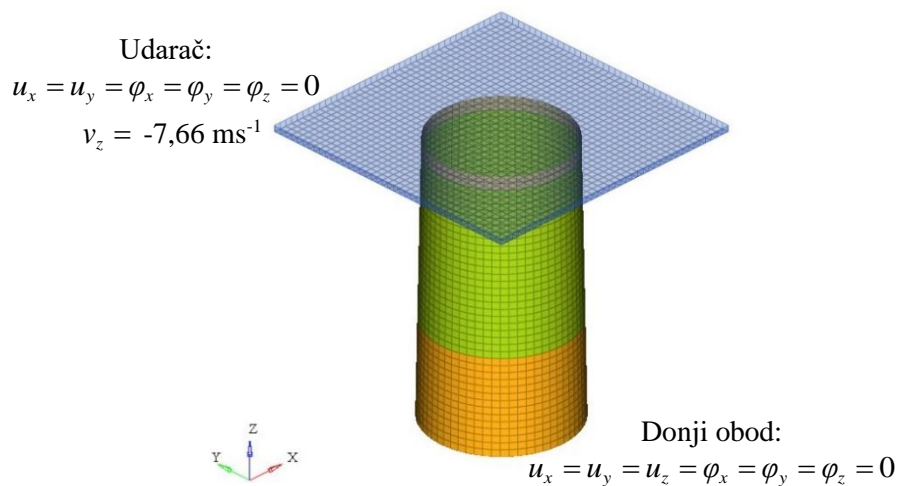
Tablica 11. Raspored slojeva apsorbera „zatvorenog“ profila

	Orijentacija				
5 slojeva	0	45	0	45	0
3 sloja	0	45	0		
2 sloja	0	0			

Apsorber „zatvorenog“ profila udarno je opterećen udaračem u obliku ploče mase 18,132 kg koji je, provodeći *Drop test*, bačen s visine od približno 3 m čime je postignuta početna brzina udara $7,66 \text{ ms}^{-1}$. Analogno kao i kod apsorbera „otvorenog“ profila, pad s 3 m nije simuliran nego je udarač približen apsorberu, a brzina od $7,66 \text{ ms}^{-1}$ nametnuta je kao početni uvjet.

Na slici 28 prikazan je numerički model u *HyperWorks*u koji identično izgleda u *Abaqus*u, a sastoji se od ukupno 4200 konačnih elemenata od čega 2440 pripada apsorberu.

Vrsta konačnih elemenata kao i postavke analize iste su kao i kod apsorbera „otvorenog“ profila uz razliku u iznosu početne brzine koja u ovom slučaju ima vrijednost $-7,66 \text{ ms}^{-1}$.



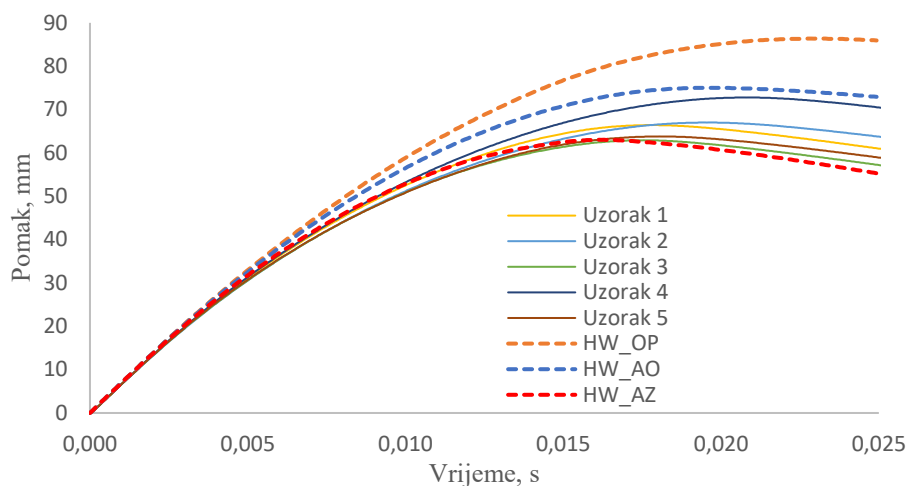
Slika 28. Numerički model „zatvorenog“ apsorbera u *HyperWorks*u

4.3. Usporedba rezultata i odabir odgovarajućeg numeričkog modela

4.3.1. Apsorber „otvorenog“ profila

Na slici 29 prikazane su krivulje intruzije udarača u ovisnosti o vremenu za tri različite materijalne kartice u *HyperWorks*u te njihova usporedba s krivuljama dobivenim

eksperimentalnim putem. Kraticom OP označena je materijalna kartica za opće ponašanje, kraticom AO materijalna kartica za apsorber „otvorenog“ profila, a kraticom AZ materijalna kartica za apsorber „zatvorenog“ profila.



Slika 29. Krivulje intruzije udarača dobivene eksperimentalnim putem i korištenjem *HyperWorksa*

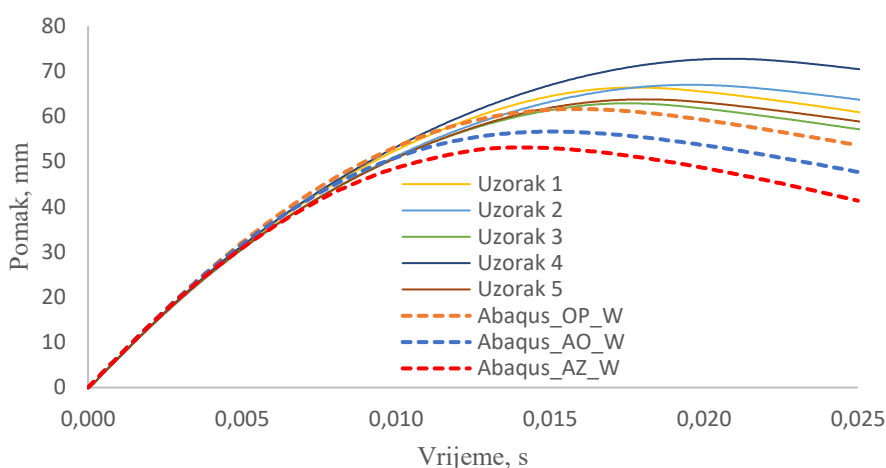
Na slici 29 se jasno vidi kako su svojstva profila podcijenjena ukoliko se koristi materijalna kartica za opće ponašanje (OP) te je intruzija prevelika. S druge strane, svojstva profila mogu se precijeniti ukoliko se koristi materijalna kartica za apsorber „zatvorenog“ profila (AZ) s obzirom na to da se postiže intruzija manja od one najviše dobivene eksperimentalnim putem. Stoga, materijalna kartica za apsorber „otvorenog“ profila (AO) „najsigurnije“ opisuje ponašanje materijala u usporedbi s eksperimentom pri čemu je maksimalna vrijednost intruzije precijenjena za 3% u odnosu na najkritičniji eksperimentalni rezultat.

Nadalje, usporedba krivulja intruzije udarača u ovisnosti o vremenu napravljena je i za tri različite materijalne kartice definirane u poglavlju 3 u *Abaqusu*, a njihovo odstupanje u odnosu na eksperimentalne rezultate moguće je vidjeti na slici 30.

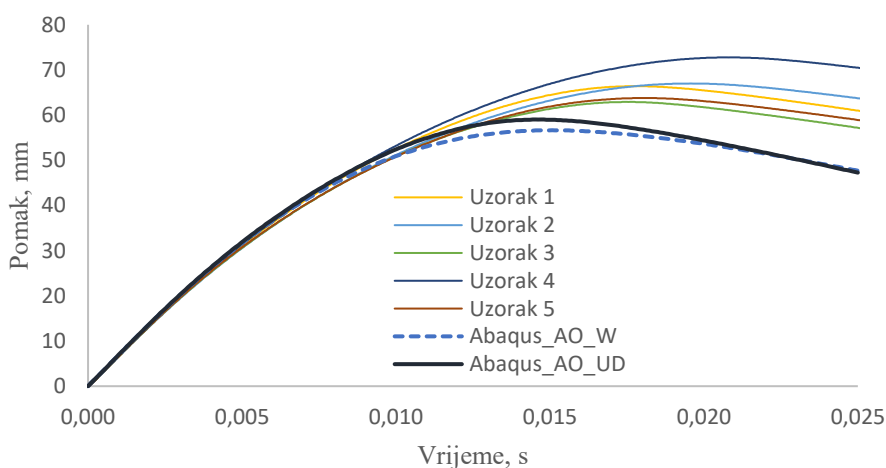
Također, kako se u ovom slučaju *Hashinov* model popuštanja primjenjuje na tkani kompozit iako je namijenjen za jednosmjerni kompozit, na slici 31 je prikazana usporedba intruzije udarača za tkani i jednosmjerni kompozit s materijalnom karticom za apsorber „otvorenog“ profila sa svojstvima iz poglavlja 3. Na slici se može primijetiti kako krivulje neznatno odstupaju jedna u odnosu na drugu i kako je pristup korišten za pretpostavljanje svojstava primjenjiv za rješavanje ovakvih problema.

Uzimajući u obzir slike 30 i 31 može se zaključiti kako se usklađivanjem površina ispod σ - u dijagrama u *Abaqusu* dobiju precijenjena svojstva u pogledu krutosti, odnosno materijal se

ponaša puno kruće nego što bi u stvarnosti trebao zbog čega se, uz pretpostavku da elastična svojstva ne utječu na odstupanje rezultata, javlja potreba za reduciranjem iznosa energije uslijed popuštanja. Nadalje, usporedbom krivulja na σ - ε dijagramu na slici 21. moguće je primijetiti kako se precjenjivanje svojstava više odražava na tlačna nego na vlačna svojstva. Naime, u tlaku se dozvoljava znatno veća deformacija u *Abaqusu* nego u *HyperWorksu*. Također, radi se o potpuno različitim kriterijima inicijacije i propagacije oštećenja što isto ide u prilog značajnom rasipanju rezultata.



Slika 30. Krivulje intruzije udarača dobivene eksperimentalnim putem i korištenjem *Abaqusa*



Slika 31. Krivulje intruzije udarača za tkani (W) i jednosmjerni (UD) kompozit dobivene korištenjem *Abaqusa*

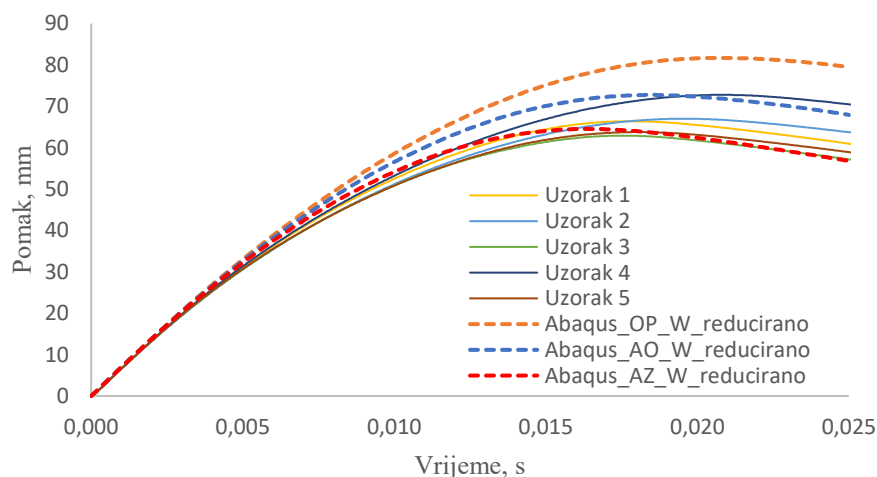
Nakon niza iteracija ispostavilo se da vrijednosti energije utrošene na popuštanje u vlaku reducirane za 10% i vrijednosti energije utrošene na popuštanje u tlaku reducirane za čak 60% za tkani kompozit puno bolje opisuju eksperimentalne rezultate u odnosu na vrijednosti dobivene u poglavlju 3 za opće ponašanje i apsorber „otvorenog“ profila dok je za apsorber

„zatvorenog“ profila potrebna redukcija za 30% u vlaknu te 80% u tlaku. Shodno tome, u nastavku rada koristit će se vrijednosti energije utrošene na popuštanje ispisane u tablici 12 za mrežu od 5 mm pri čemu su vrijednosti za jednosmjerni kompozit izračunate korištenjem reduciranih vrijednosti za tkani kompozit te jednadžbi od (55) do (58) koje su se u poglavlju 3 pokazale prikladnim za procjenu svojstava jednosmjernog kompozita u odnosu na tkani.

Tablica 12. Reducirane vrijednosti energije utrošene na popuštanje tkanog (W) i jednosmjernog (UD) kompozita

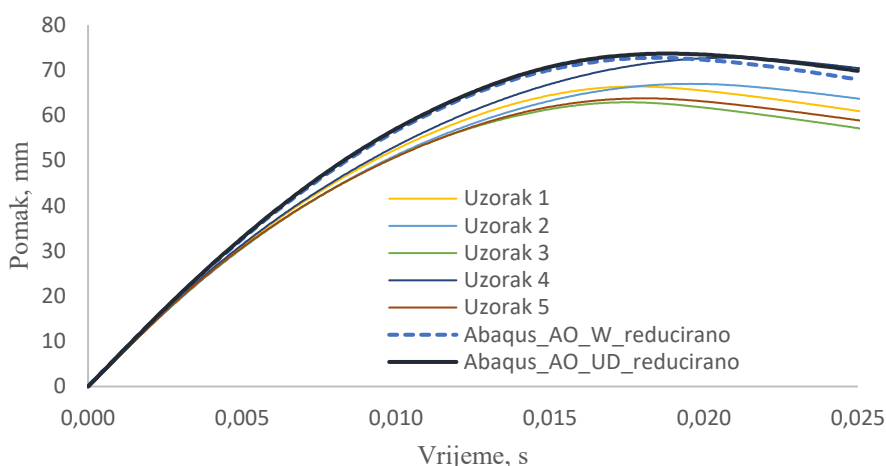
	$G_{ft}^c, \text{Nmm}^{-1}$	$G_{fc}^c, \text{Nmm}^{-1}$	$G_{mt}^c, \text{Nmm}^{-1}$	$G_{mc}^c, \text{Nmm}^{-1}$
OP_W	57,42	34,92	57,42	34,92
OP_UD	113,59	64,68	1,25	5,16
AO_W	60,89	54,06	60,89	54,06
AO_UD	120,46	100,13	1,32	7,99
AZ_W	63,14	80,94	63,14	80,94
AZ_UD	124,91	149,92	1,37	11,96

Na slici 32 prikazana je usporedba krivulja intruzije udarača za tkani kompozit i tri materijalne kartice dobivene koristeći reducirane vrijednosti energije utrošene na popuštanje iz tablice 12 u *Abaqusu*.



Slika 32. Krivulje intruzije udarača dobivene eksperimentalnim putem i s novim vrijednostima energije utrošene na popuštanje korištenjem *Abaqusa*

Na slici 33 prikazana je usporedba krivulja intruzije udarača za tkani (W) i jednosmjerni (UD) kompozit i materijalnu karticu za apsorber „otvorenog“ profila (AO) dobivenu koristeći reducirane vrijednosti energije popuštanja iz tablice 12.

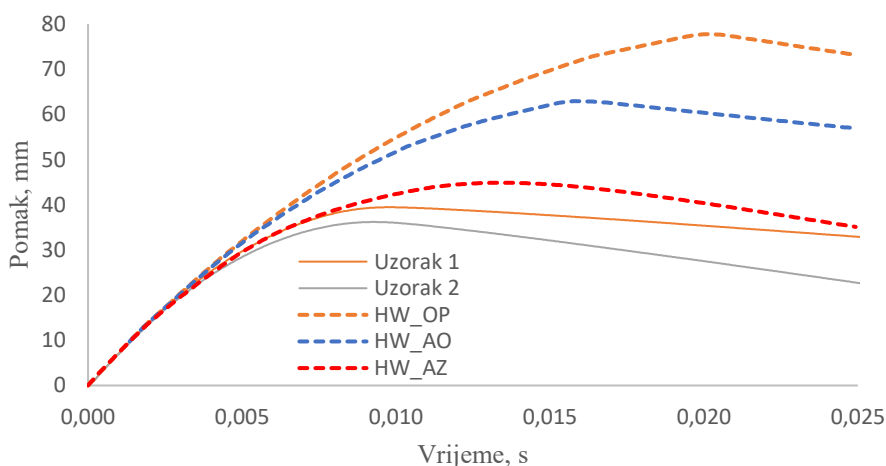


Slika 33. Krivulje intruzije udarača za tkani (W) i jednosmjerni (UD) kompozit dobivene korištenjem Abaqusa s reduciranim vrijednostima energije utrošene na popuštanje

Uspoređujući materijalne kartice s reduciranim vrijednostima energije utrošene na popuštanje u *Abaqusu* (Slika 32) u odnosu na one iz *HyperWorks*a (Slika 29) primjetno je znatno manje odstupanje zbog čega će se u nastavku rada u *Abaqusu* koristiti upravo tako definirane materijalne kartice.

4.3.2. Apsorber „zatvorenog“ profila

Na slici 34 nalaze se krivulje intruzije udarača u ovisnosti o vremenu za tri različite materijalne kartice u *HyperWorksu* te njihova usporedba s krivuljama dobivenim eksperimentalnim putem.

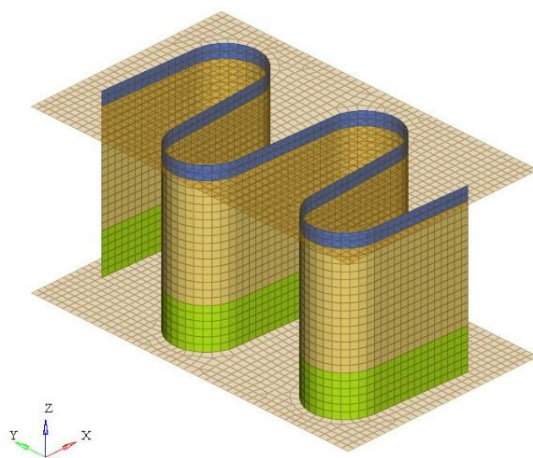


Slika 34. Krivulje intruzije udarača dobivene eksperimentalnim putem i korištenjem HyperWorksa

Na slici 34 moguće je primijetiti kako bi se korištenjem materijalnih kartica za opće ponašanje (OP) i apsorber „otvorenog“ profila (AO) svojstva materijala podcijenila jer se s njima postiže

znatno veća intruzija nego što u stvarnosti jest. Shodno tome, materijalna kartica za apsorber „zatvorenog“ profila (AO) najrealnije opisuje ponašanje materijala u usporedbi s eksperimentom zbog čega će se u nastavku rada koristiti za slične probleme.

Međutim, iako je apsorber „zatvorenog“ profila poslužio za usporedbu materijalnih kartica, detaljnijom analizom rezultata moguće je primijetiti numeričku nestabilnost modela kako u *HyperWorksu* tako i u *Abaqusu* zbog čega se u nastavku nije koristio, a novim apsorberom „zatvorenog“ profila razmatran je „sinus“ uzorak sa slike 35 koji je s gornje strane „zatvoren“ pločom s 3 sloja CF283 T700 EF455 2x2 *Twill* debljine 0,32 mm i orijentacije [0/45/0] kako bi se na taj način dobio i opisao efekt „zatvorenog“ profila.



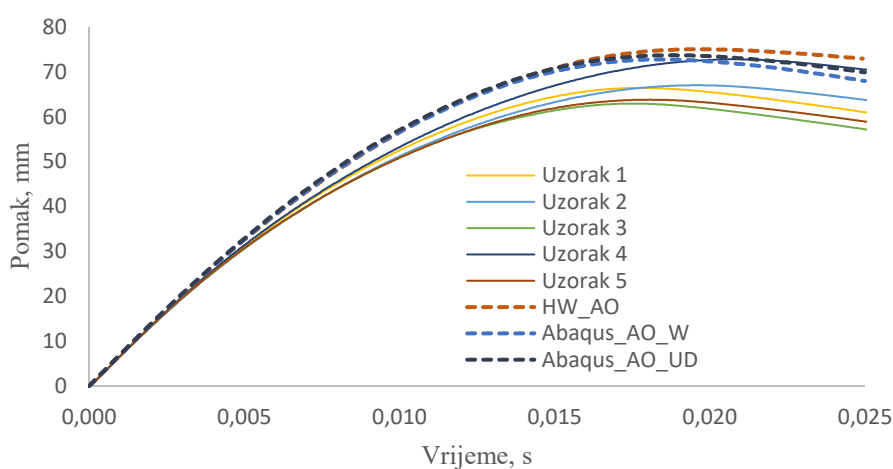
Slika 35. Sinus uzorak „zatvorenog“ profila

Na apsorber sa slike 35 djeluje hemisferni udarač kao i kod apsorbera „otvorenog“ profila pri čemu je brzina udarača nametnuta kao početni uvjet. Također, provedena je nelinearna dinamička analiza s eksplicitnom vremenskom integracijom na numeričkom modelu koji se sastoji od ukupno 12293 konačna elementa od čega 6125 pripada apsorberu. Budući da odbijanje udarača nastupa prije nego kod apsorbera „otvorenog“ profila, ukupno simulirano vrijeme iznosi 20 ms.

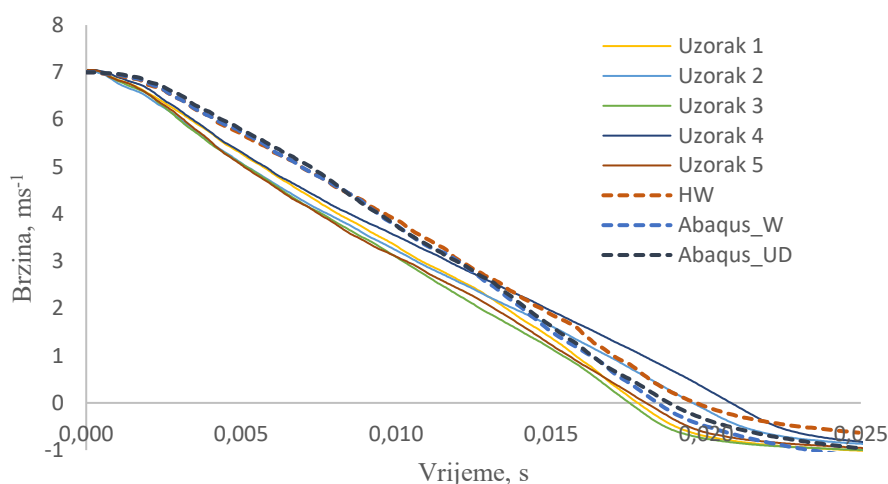
5. REZULTATI

5.1. Udar pri različitim početnim brzinama udarača na apsorber „otvorenog“ profila

Na slici 36 su prikazane krivulje intruzije, a na slici 37 krivulje brzine udarača dobivene eksperimentalnim putem (Uzorak 1-5), pomoću *HyperWorks*a za tkani (AO) te *Abaqusa* za tkani (AO_W) i jednosmjerni (AO_UD) kompozit pri početnoj brzini udarača od 7 ms^{-1} za apsorber „otvorenog“ profila.



Slika 36. Krivulje intruzije udarača u apsorber „otvorenog“ profila pri $v_0 = 7 \text{ ms}^{-1}$



Slika 37. Krivulje brzine udarača uslijed udara u apsorber „otvorenog“ profila pri $v_0 = 7 \text{ ms}^{-1}$

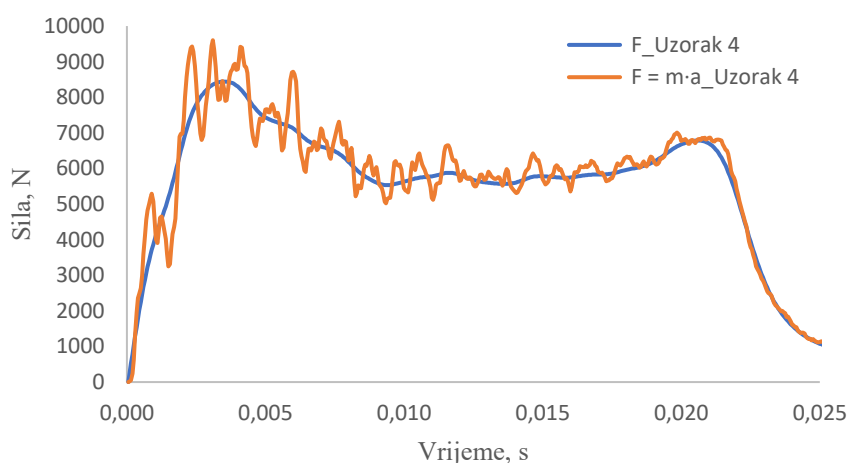
Analizirajući prethodne dvije slike moguće je primijetiti neznatno odstupanje među programskim paketima kao i među modelima s tkanim i jednosmjernim kompozitom u *Abaqusu* zbog čega će se u nastavku analize koristiti rezultati iz *HyperWorks*a.

Nadalje, uspoređujući silu dobivenu eksperimentalnim putem i izračunatu primjenjujući drugi *Newtonov zakon* [21]:

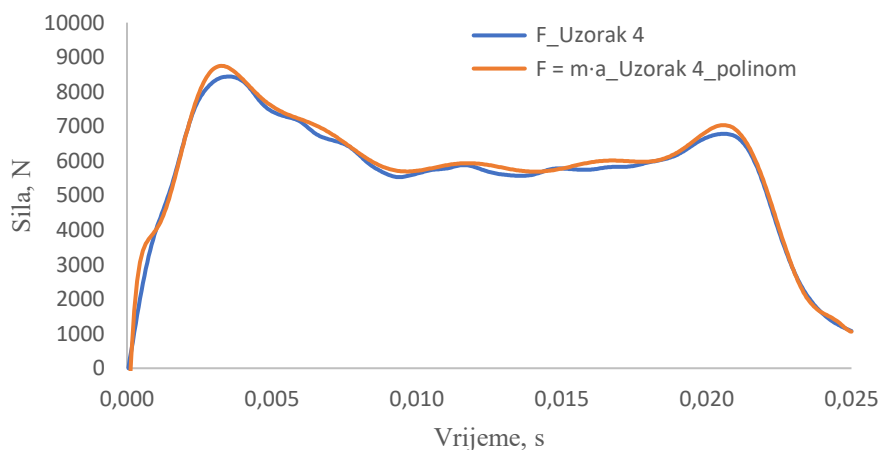
$$F = ma, \quad (59)$$

pri čemu je m masa udarača, a a akceleracija dobivena eksperimentalnim putem, moguće je primijetiti kako krivulja sile otprilike predstavlja polinom krivulje „ ma “ kako je i prikazano na slici 38 za uzorak 4.

Kako bi se iznesena teorija provjerila, koristeći *MATLAB* krivulja „ ma “ opisana je polinomom 15. stupnja, a usporedba sa stvarnom krivuljom sile dobivenom eksperimentalnim putem prikazana je na slici 39.



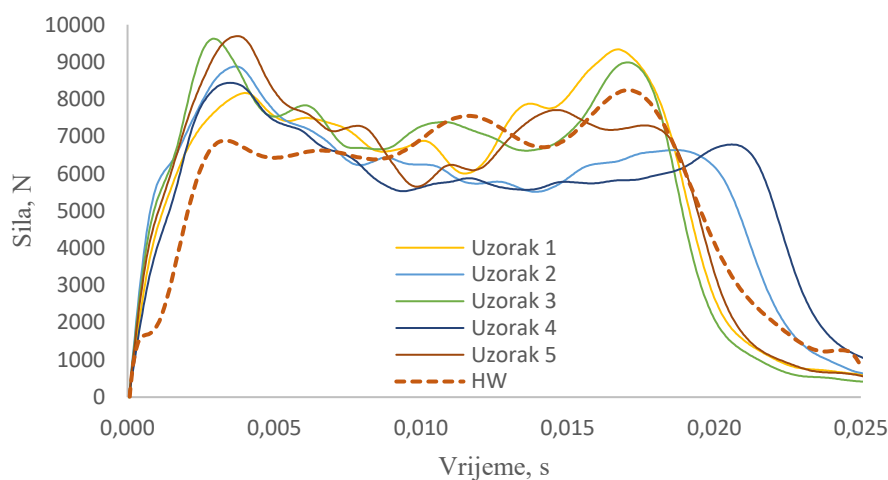
Slika 38. Primjena drugog *Newtonova zakona* za izračun udarne sile



Slika 39. Usporedba stvarne sile i sile dobivene primjenjujući drugi *Newtonov zakon* na eksperimentalnim podacima

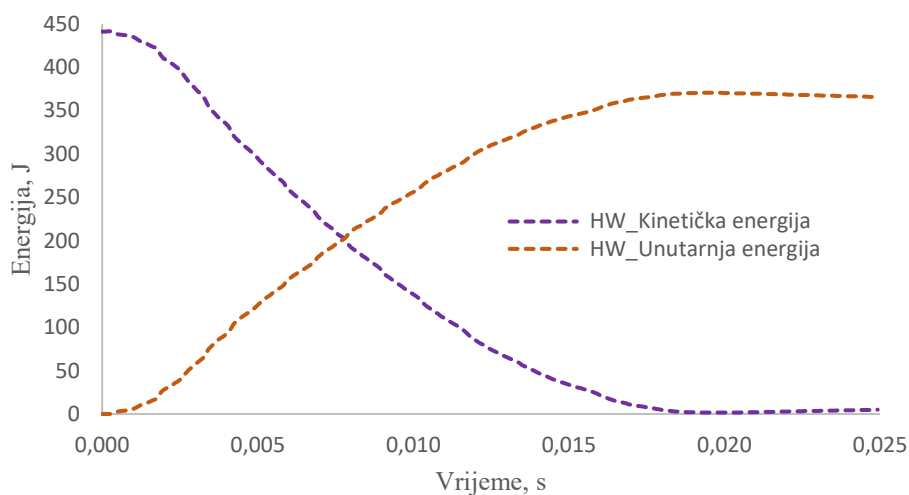
S obzirom na prethodno navedeno, za izračun sile udara iz podataka dobivenih putem programskih paketa koristit će se drugi *Newtonov zakon*.

Shodno tome, na slici 40 prikazana je usporedba krivulja sile udara dobivena eksperimentalnim putem te unutar programskog paketa *HyperWorks*.



Slika 40. Krivulje sile udara u apsorbirajućem profilu pri $v_0 = 7 \text{ ms}^{-1}$

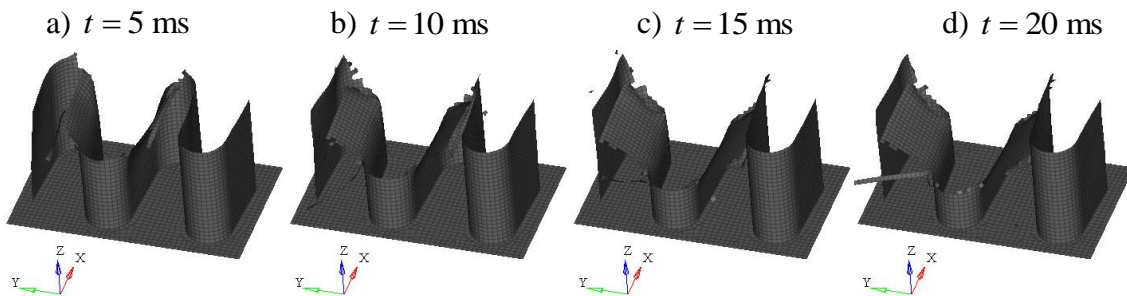
Naposlijetku, kako eksperimentalna krivulja apsorbirane energije nije zabilježena, na slici 41 prikazane su samo krivulje kinetičke te unutarnje (apsorbirane) energije dobivene unutar programskog paketa *HyperWorks*.



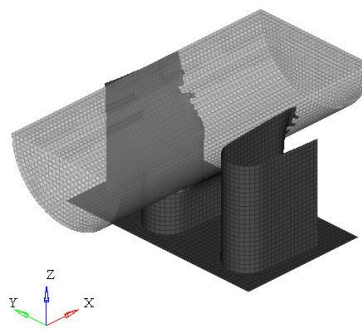
Slika 41. Krivulje kinetičke i unutarnje energije uslijed udara u apsorbirajućem profilu pri $v_0 = 7 \text{ ms}^{-1}$

Na slici 41 se jasno vidi kako sva kinetička energija udarača nije apsorbirana, a razlog tome je što je unutar numeričkog modela u obzir uzet i utjecaj trenja kako bi se eksperiment što realnije opisao, odnosno numerika što više približila stvarnom fizikalnom problemu. Naime, uz izostavljanje trenja, gotovo cijeli iznos kinetičke energije bio bi apsorbiran, a to bi rezultiralo i većom intruzijom udarača što u realnosti nije slučaj.

Na slici 42 je prikazana progresija oštećenja u vremenu dok je na slici 43 prikazan deformirani oblik u trenutku postizanja maksimalne intruzije udarača na numerički model u *HyperWorks*.



Slika 42. Progresija oštećenja apsorbera „otvorenog“ profila pri $v_0 = 7 \text{ ms}^{-1}$



Slika 43. Deformirani oblik u trenutku maksimalne intruzije udarača ($t = 19,7 \text{ ms}$) u apsorber „otvorenog“ profila pri $v_0 = 7 \text{ ms}^{-1}$

Na slici 44 je prikazan udarač i „sinus“ uzorak u trenutku provođenja eksperimenta dok se na slici 45 nalazi deformirani oblik uzorka 4 nakon testa.

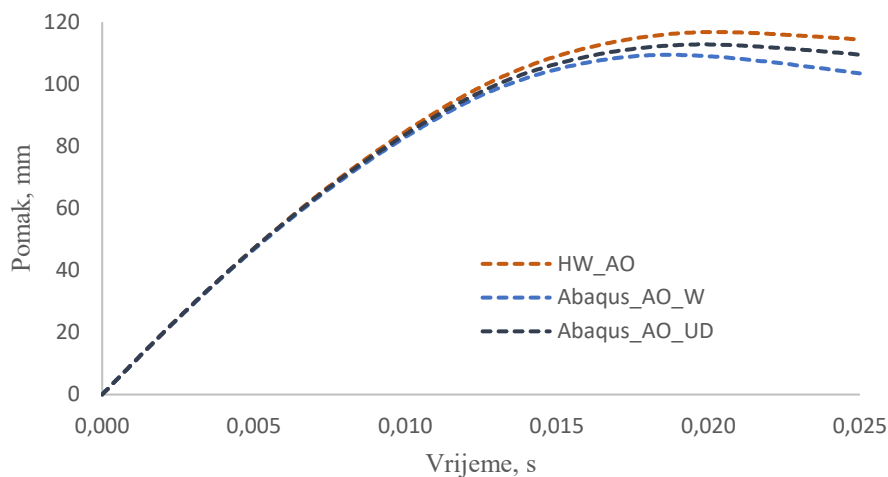


Slika 44. Provođenje eksperimenta



Slika 45. Deformirani uzorak 4

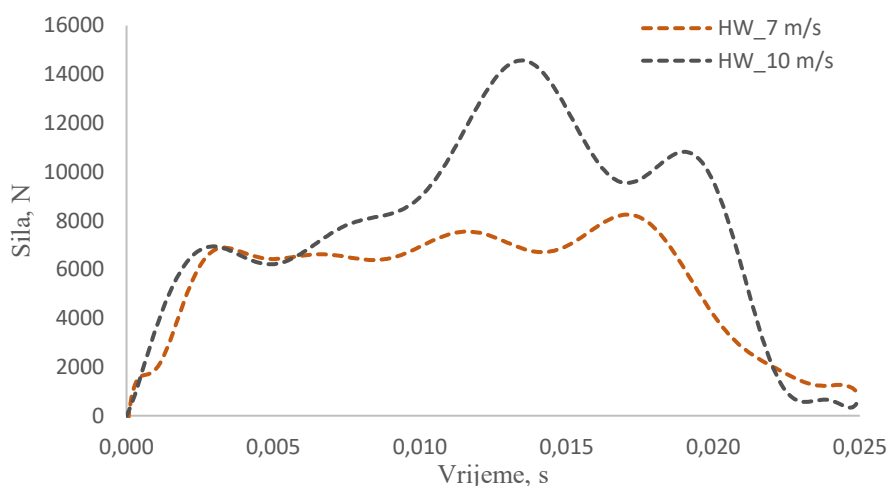
Nadalje, simulacija *Drop testa* je napravljena i pri početnoj brzini od 10 ms^{-1} , a na slici 46 su prikazane krivulje intruzije udarača dobivene numeričkim putem pomoću *HyperWorksa* za tkani (AO) te *Abaqusa* za tkani (AO_W) i jednosmjerni (AO_UD) kompozit.



Slika 46. Krivulje intruzije udarača u apsorber „otvorenog“ profila pri $v_0 = 10 \text{ ms}^{-1}$

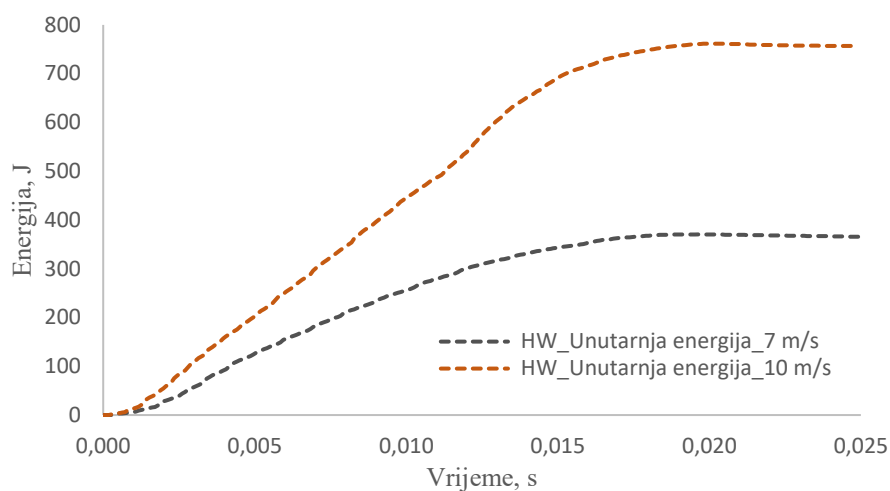
S obzirom na to da su numerički modeli na prethodnoj slici potvrdili logiku korištenih materijalnih kartica iznesenu kod udara s početnom brzinom od 7 ms^{-1} u nastavku će se koristiti rezultati iz *HyperWorksa*.

Na slici 47 je prikazana usporedba krivulja sile udara za udare pri početnim brzinama udarača od 7 i 10 ms^{-1} dobivena koristeći drugi *Newtonov* zakon kako je prethodno objašnjeno.



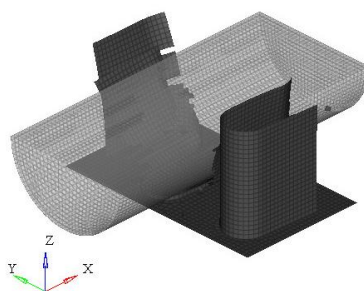
Slika 47. Usporedba krivulja sile udara na apsorber „otvorenog“ profila pri različitim početnim brzinama udarača

Na slici 48 je prikazana usporedba krivulja unutarnje energije za udare pri početnim brzinama udarača od 7 i 10 ms^{-1} .



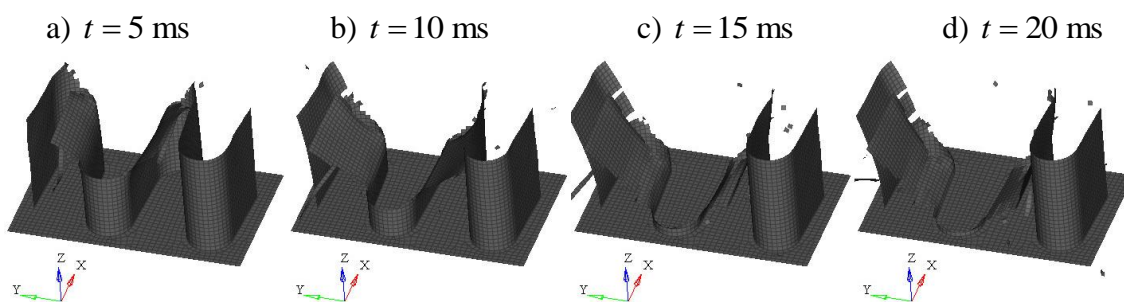
Slika 48. Usporedba krivulja unutarnje energije prilikom udara u apsorber „otvorenog“ profila pri različitim početnim brzinama udarača

Budući da pri udaru s početnom brzinom od 10 ms^{-1} na uzorak djeluje duplo veća energija udarača, iznos apsorbirane energije je također duplo veći, a intruzija znatno dublja što je moguće vidjeti na slici 49 na kojoj je prikazan deformirani oblik u trenutku maksimalne intruzije udarača.



Slika 49. Deformirani oblik u trenutku maksimalne intruzije udarača ($t = 20,6 \text{ ms}$) u apsorber „otvorenog“ profila pri $v_0 = 10 \text{ ms}^{-1}$

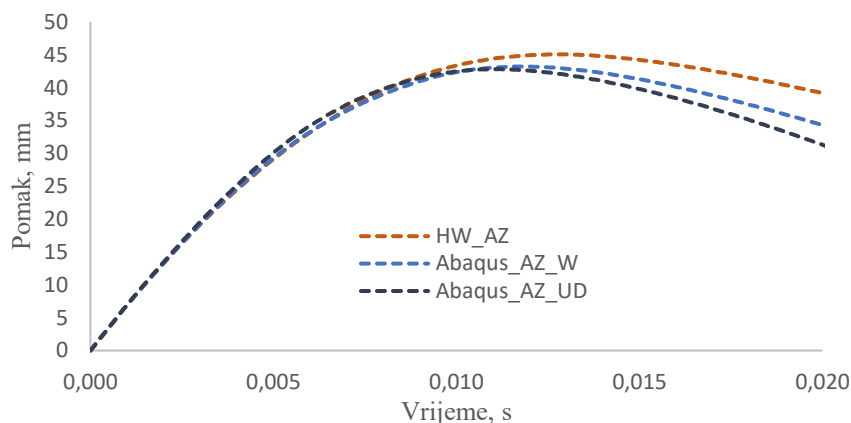
Na slici 50 je prikazana progresija oštećenja u vremenu pri udaru s početnom brzinom udarača od 10 ms^{-1} .



Slika 50. Progresija oštećenja apsorbera „otvorenog“ profila pri $v_0 = 10 \text{ ms}^{-1}$

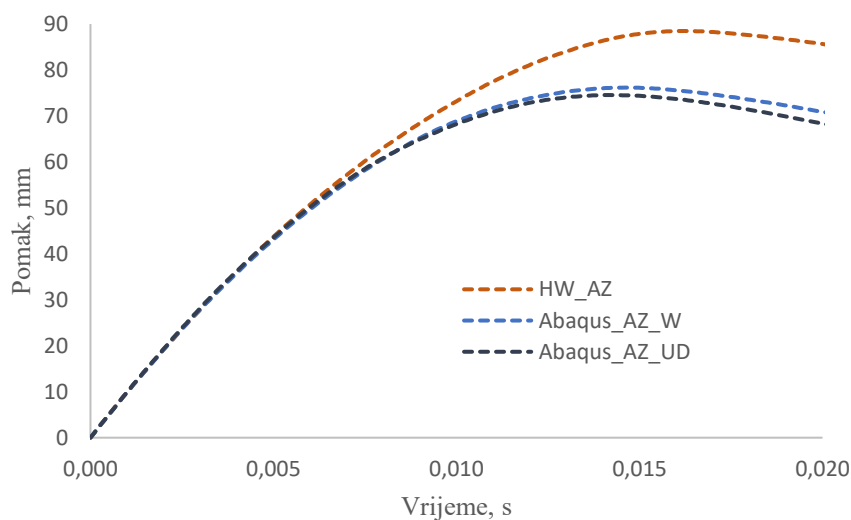
5.2. Udar pri različitim početnim brzinama udarača na apsorber „zatvorenog“ profila

Na slici 51 su prikazane krivulje intruzije udarača dobivene simulacijom *Drop testa* pri početnoj brzini od 7 ms^{-1} na apsorberu „zatvorenog“ profila prema slici 35 pomoću *HyperWorksa* za tkani (AZ) te *Abaqusa* za tkani (AZ_W) i jednosmjerni (AZ_UD) kompozit.



Slika 51. Krivulje intruzije udarača u apsorber „zatvorenog“ profila pri $v_0 = 7 \text{ ms}^{-1}$

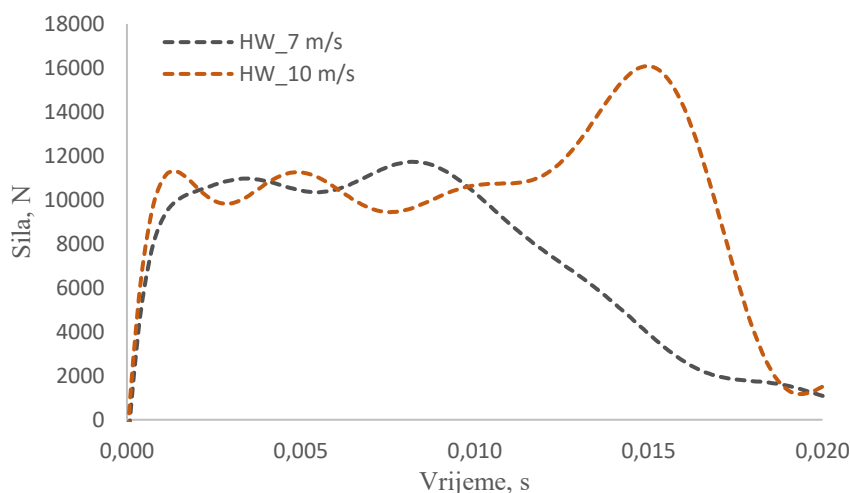
Na slici 52 su prikazane krivulje intruzije udarača dobivene simulacijom *Drop testa* na istom uzorku, ali pri početnoj brzini od 10 ms^{-1} .



Slika 52. Krivulje intruzije udarača u apsorber „zatvorenog“ profila pri $v_0 = 10 \text{ ms}^{-1}$

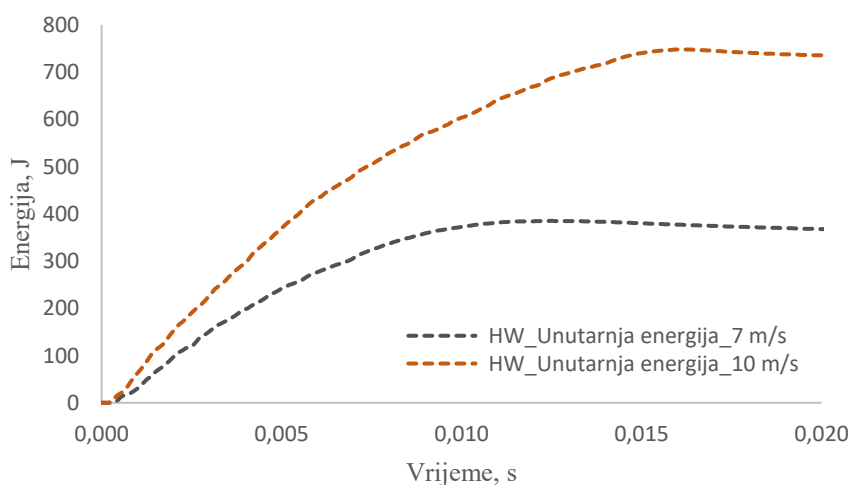
Važno je primijetiti kako je odstupanje materijalne kartice za „zatvoreni“ profil među programskim paketima značajnije u odnosu na „otvoreni“ profil te kako s povećanjem brzine udara sve više dolazi do izražaja. Mogući razlog tome je detaljnije modelirana i opisana propagacija oštećenja u *HyperWorksu* u odnosu na onu opisanu samo jednim parametrom (energija utrošena na popuštanje) u *Abaqusu*.

Na slici 53 je prikazana usporedba sila udara za udare na apsorber „zatvorenog“ profila pri početnim brzinama od 7 i 10 ms⁻¹ dobivena primjenjujući drugi *Newtonov* zakon na rezultatima iz *HyperWorksa*. U odnosu na apsorber „otvorenog“ profila, prosječne sile udara u apsorber „zatvorenog“ profila imaju veći iznos, a razlog tome kao i znatno manjoj intruziji ovako modeliranog uzorka je materijalna kartica kod koje duktilnost materijala dolazi do izražaja.



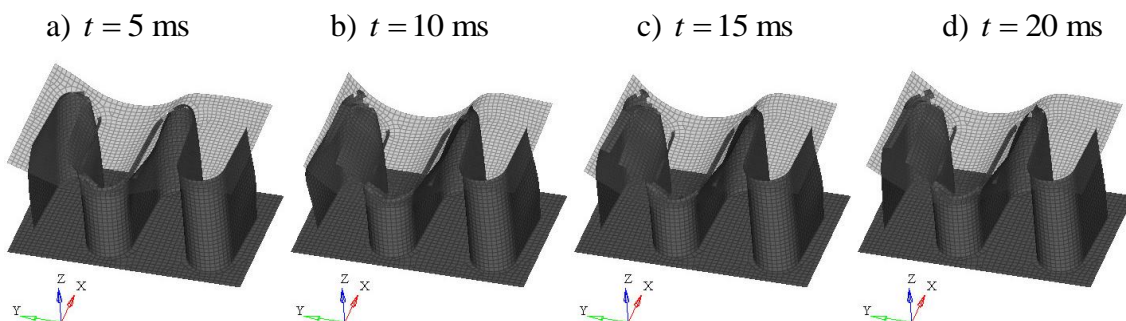
Slika 53. Usporedba krivulja sile udara na apsorber „zatvorenog“ profila pri različitim početnim brzinama

Na slici 54 je prikazana usporedba krivulja unutarnje energije za udare pri početnim brzinama udarača od 7 i 10 ms⁻¹ na apsorber „zatvorenog“ profila. Analogno, kao i kod apsorbera „otvorenog“ profila, pri udaru s početnom brzinom od 10 ms⁻¹ na uzorak djeluje duplo veća energija udarača pa je i iznos apsorbirane energije duplo veći, a intruzija dublja.



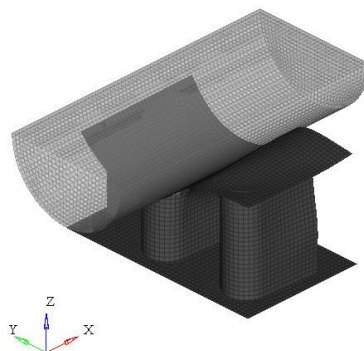
Slika 54. Usporedba krivulja unutarnje energije prilikom udara u apsorber „zatvorenog“ profila pri različitim početnim brzinama udarača

Na slici 55 je prikazana progresija oštećenja u vremenu dok je na slici 56 prikazan deformirani oblik u trenutku postizanja maksimalne intruzije udarača u apsorber „zatvorenog“ profila pri početnoj brzini udarača od 7 ms^{-1} .



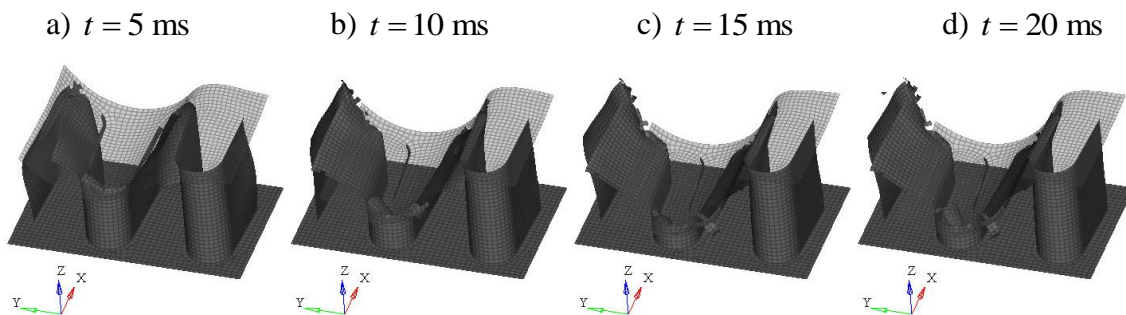
Slika 55. Progresija oštećenja apsorbera „otvorenog“ profila pri $v_0 = 10 \text{ ms}^{-1}$

Na prethodnoj je slici gornja ploča „sinus“ uzorka transparentna zbog lakše vizualizacije deformiranog oblika.

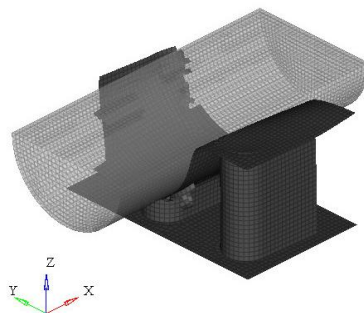


Slika 56. Deformirani oblik u trenutku maksimalne intruzije udarača ($t = 12,8 \text{ ms}$) u apsorber „zatvorenog“ profila pri $v_0 = 7 \text{ ms}^{-1}$

Nadalje, na slici 57 je prikazana progresija oštećenja, a na slici 58 deformirani oblik apsorbera u trenutku postizanja maksimalne intruzije, ali pri početnoj brzini udarača od 10 ms^{-1} .

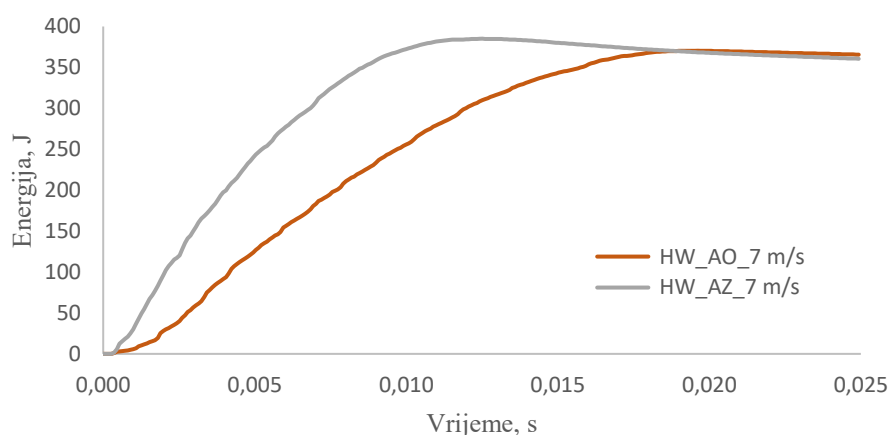


Slika 57. Progresija oštećenja apsorbera „otvorenog“ profila pri $v_0 = 10 \text{ ms}^{-1}$



Slika 58. Deformirani oblik u trenutku maksimalne intruzije udarača ($t = 16,2$ ms) u apsorber „zatvorenog“ profila pri $v_0 = 10$ ms⁻¹

Na slici 59 je prikazana usporedba krivulja unutarnje energije za udar pri početnoj brzini udarača od 7 ms⁻¹ na apsorber „otvorenog“ i „zatvorenog“ profila pri čemu se jasno vidi kako je iznos apsorbirane energije u konačnici isti, ali kod apsorbera „zatvorenog“ profila nastupa puno prije nego kod apsorbera „otvorenog“ profila jer se udarač odbije ranije zbog veće krutosti „zatvorenog“ profila kao što je prethodno objašnjeno i ilustrirano na slikama 55 i 57. Analogno vrijedi i pri udaru s početnom brzinom od 10 ms⁻¹.

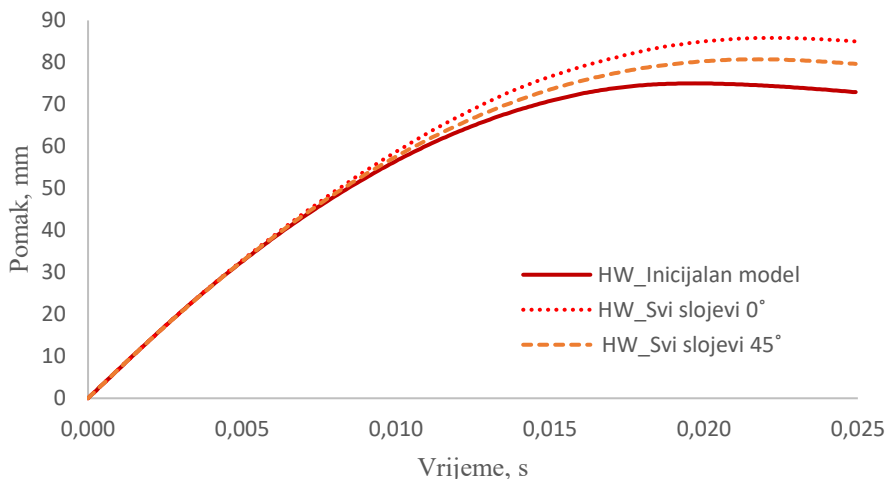


Slika 59. Usporedba krivulja unutarnje energije za udar pri $v_0 = 7$ ms⁻¹ na apsorber „otvorenog“ i „zatvorenog“ profila

5.3. Sposobnost apsorbiranja energije uz promijenjen raspored slojeva

Budući da je u radu analiziran tkani kompozit (CF283 T700 EF455 2x2 *Twill*) ortogonalno raspoređenih vlakana [0/90], drugačijim rasporedom slojeva ponašanje se neće značajno promijeniti. S druge pak strane, jednosmjerne kompozite karakterizira anizotropnost pa bi se eventualnim promjenama u rasporedu njihovih slojeva lakše postigla bolja svojstva u određenom smjeru. Ipak, unutar programskog paketa *HyperWorks* postojećem numeričkom modelu apsorbera „otvorenog“ profila promijenjen je raspored slojeva i simuliran je udar s

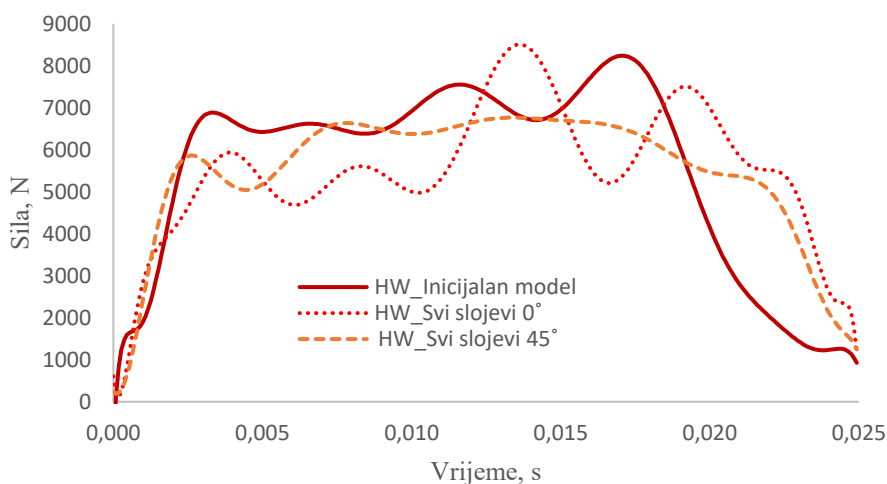
početnom brzinom udarača od 7 ms^{-1} . Uz inicijalni model, rasporeda slojeva prema tablici 10, napravljen je model kojem su svi slojevi orijentirani pod 0° te model u kojem su svi slojevi orijentirani pod 45° , a usporedba krivulja intruzije udarača prikazana je na slici 60.



Slika 60. Ovisnost krivulje intruzije udarača o rasporedu slojeva uslijed udara u apsorber „otvorenog“ profila pri $v_0 = 7 \text{ ms}^{-1}$

Na slici 60 je moguće primijetiti kako se u modelu u kojem su svi slojevi orijentirani pod 0° ostvaruje najveća intruzija udarača. Razlog tome je što se takvom orijentacijom slojeva postiže najmanja krutost uzorka u smjeru opterećenja. Nadalje, ako bi svi slojevi bili orijentirani pod 45° , postigla bi se nešto manja intruzija udarača što znači i krući model u smjeru opterećivanja. Naposljetku, inicijalnim modelom se postiže najmanja intruzija udarača pa se takav model u kontekstu krutosti smatra optimalnim.

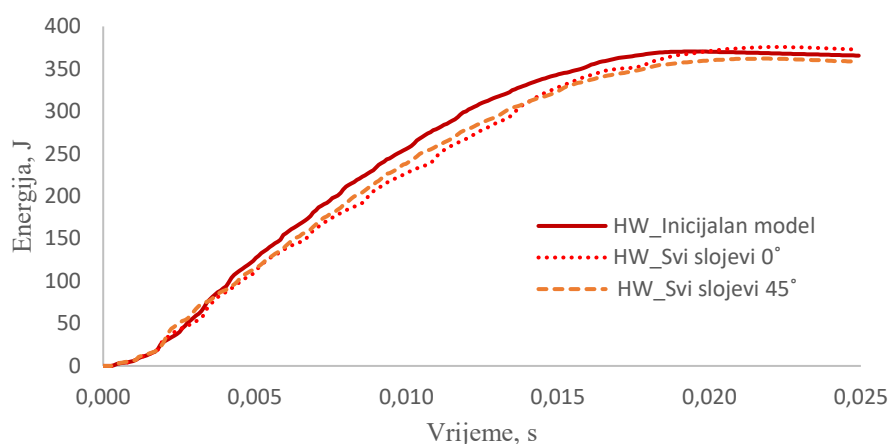
Na slici 61 je prikazana ovisnost sile udara o prethodno definiranim rasporedima slojeva.



Slika 61. Ovisnost sile udara o rasporedu slojeva

Moguće je primijetiti kako uzorak kod kojeg se postiže najveća intruzija ima najmanju prosječnu silu udara što je bilo i očekivano s obzirom na to da najmanje krut model pruža najmanji otpor udaru. S druge pak strane, inicijalni model ima najveću prosječnu silu udara jer je u ovom slučaju najkruci zbog čega se i ostvaruje najmanja intruzija udarača kao što je prethodno objašnjeno.

Naposlijetku, na slici 62 je prikazana ovisnost apsorbirane energije o rasporedu slojeva pri čemu se jasno vidi neznatno odstupanje što je bilo i očekivano s obzirom na to da je unesena energija u svakom od modela ista, a gubici energije uslijed trenja su istog reda veličine.



Slika 62. Ovisnost apsorbirane energije o rasporedu slojeva

6. ZAKLJUČAK

Cilj ovog diplomskog rada je bio razviti odgovarajući numerički model kojim bi se mogla predvidjeti sposobnost apsorpcije kompozitnog materijala oznake CF283 T700 EF455 2x2 *Twill* uslijed djelovanja udarnog opterećenja.

Analizom eksperimentalnih rezultata pokazalo se kako je i sam oblik kompozitne konstrukcije jedan od faktora koji utječe na generalno ponašanje kompozitnog materijala te kako bi se korištenjem istog materijalnog modela za rješavanje različitih problema unijela velika greška u pretpostavci svojstava materijala. Shodno tome, razvijeno je više materijalnih kartica koje se razlikuju u modeliranju propagacije oštećenja.

Nadalje, numerička analiza je provedena koristeći dva programska paketa (*HyperWorks* i *Abaqus*) s dva različita kriterija popuštanja (unaprijeđeni *Tsai-Wu* i *Hashin*) pri čemu su u poglavlju 3 istaknute glavne razlike među njima dok je u poglavlju 4 provedena korelacija kako bi se materijalni model u *Abaqusu* što više približio postojećem modelu u *HyperWorksu*, odnosno eksperimentalnim rezultatima. Budući da je u *Abaqusu* implementirani *Hashinov* kriterij popuštanja namijenjen za analizu jednosmjernih kompozita, u radu je dan prijedlog kako iz postojećeg modela za tkani kompozit dobiti svojstva za jednosmjerni pri čemu su oba primijenjena u numeričkim simulacijama, a rezultati su uspoređeni s eksperimentalnim rezultatima.

Usporedbom eksperimentalnih i numeričkih rezultata dobivenih korištenjem tri različite materijalne kartice unutar *HyperWorksa* primijeti se značajno odstupanje rezultata. Naime, ovisno o načinu modeliranja propagacije oštećenja, postiže se manje ili više „duktilan“ model što uvelike diktira generalno ponašanje numeričkog modela. S obzirom na to da je eksperimentom pokazano kako je apsorber „zatvorenog“ profila krući i kako odbijanje udarača nastupa puno prije u odnosu na apsorber „otvorenog“ profila, takav numerički model zahtijeva materijalnu karticu kojom se opisuje više duktilno ponašanje. U suprotnom, svojstva tako definiranog apsorbera bi se značajno podcijenila što bi rezultiralo većom intruzijom nego što se u stvarnosti očekuje. Razlog tome je nekonzistentno ponašanje kompozitnih materijala čija je svojstva generalno teško predvidjeti jer se radi o nehomogenim materijalima. Upravo zbog toga je važno, prije definiranja numeričkog modela, provesti niz eksperimentalnih ispitivanja bilo statičkih bilo dinamičkih kako bi se na taj način spriječilo eventualno pogrešno interpretiranje rezultata.

Nadalje, usporedbom rezultata dobivenih unutar dva različita programska paketa, može se primijetiti kako je kod apsorbera „otvorenog“ profila razlika neznčajna dok je kod apsorbera „zatvorenog“ profila puno veća i još se više uočava pri udaru s većom početnom brzinom udarača, tj. pri udaru s početnom brzinom udarača 10 ms^{-1} u odnosu na udar s početnom brzinom 7 ms^{-1} . Razlog tome je svakako puno detaljnije opisana materijalna kartica u *HyperWorksu* zbog čega ju je puno lakše prilagoditi eksperimentalnim rezultatima u odnosu na onu u *Abaqusu* opisanu samo jednim parametrom, odnosno energijom utrošenom na popuštanje. Iznesena konstatacija se odnosi na numerički model s tkanim i jednosmjernim kompozitom, odnosno iako rezultati dobiveni numeričkim modelima u *Abaqusu* odstupaju u odnosu na one dobivene u *HyperWorksu* moguće je primijetiti kako modeli u *Abaqusu* neznatno odstupaju jedan u odnosu na drugi. Shodno tome, može se zaključiti kako se *Hashinov* model, iako namijenjen za jednosmjerne kompozite, može koristiti za rješavanje sličnih problema i primijeniti na tkane kompozite. Također, osim toga što se korištenjem tkanih kompozita rezultati ne mijenjaju značajno, vremensko trajanje analize je znatno kraće što uvelike štedi računalne resurse i ubrzava proces rješavanja spomenute problematike.

Naposlijetku, provjeren je i utjecaj drugačijeg rasporeda slojeva na sposobnost apsorbaranja kinetičke energije udarača. Osim inicijalnog modela apsorbera „otvorenog“ profila, analizirana su još dva: jedan u kojem su svi slojevi orijentirani pod 0° i jedan u kojem su svi slojevi orijentirani pod 45° . Na tako definirane modele je djelovao udarač s početnom brzinom udara u iznosu od 7 ms^{-1} pri čemu se ispostavilo da model kod kojeg su svi slojevi orijentirani pod 0° ima najveću intruziju udarača. S druge pak strane, kod inicijalnog modela se ostvaruje najmanja intruzija udarača, a model kod kojeg su svi slojevi orijentirani pod 45° po krutosti se nalazi negdje između njih. Shodno tome, inicijalni model predstavlja najkrući model za takav način opterećivanja i na njemu se ostvaruje najveća udarna sila zbog čega prvi apsorbari kinetičku energiju udarača.

LITERATURA

- [1] <https://www.mecum.com/lots/FL0120-397339/1953-chevrolet-corvette-roadster/>; dostupno 14.1.2020.
- [2] http://mp4-12c.over-blog.com/pages/Carbon_pioneers-4755912.html; dostupno 14.1.2020.
- [3] https://www.rimac-automobili.com/en/hypercars/c_two/; dostupno 14.1.2020.
- [4] Ćorić D., Filetin T.: Materijali u zrakoplovstvu, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.
- [5] Filetin T., Kovačiček F., Indof J.: Svojstva i primjena materijala, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.
- [6] Smojver I.: Mehanika kompozitnih materijala, nastavni materijal Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, ver. 06/2007.
- [7] Carvalho L. H., Canedo E. L., Farias Neto S. R., de Lima A. G. B., Silva C. J.: Moisture Transport Process in Vegetable Fiber Composites: Theory and Analysis for Technological Applications, Industrial and Technological Applications of Transport in Porous Materials, Springer, Berlin/Heidelberg, 2013.
- [8] Razali N., Sultan M.T.H., Jawaid M.: Impact damage analysis of hybrid composite materials, Durability and Life Prediction in Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites, Woodhead Publishing, Sawston/Cambridge 2019.
- [9] <https://www.compositesworld.com/articles/impact-testing-of-composite-materials>; dostupno 17.1.2020.
- [10] <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/charpy-impact-test>; dostupno 17.1.2020.
- [11] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822313004728>; dostupno 17.1.2020.
- [12] Pietropaoli E.: Virtual Crack Closure Technique and Finite Element Method for Predicting the Delamination Growth Initiation in Composite Structures, Advances in Composite Materials, Analysis of Natural and Man-Made Materials, InTech, Rijeka, 2011.
- [13] <https://www.pngfly.com/png-3906cx/>; dostupno 17.1.2020.

-
- [14] Kollar L. P., Springer G. S.: *Mechanics of Composite Structures*, Cambridge University Press, 2003.
- [15] Daniel I. M., Luo J. J., Schubel P. M., Werner B. T.: Interfiber/interlaminar failure of composites under multi-axial states of stress, *Composites Science and Technology*, 69(6), 764-771, 2009.
- [16] Narayana K.J., Burela R.G.: Multi-scale modeling and simulation of natural fiber reinforced composites (Bio-composites), IOP Publishing, *Journal of Physics: Conference Series*, 1240, 2019.
- [17] Altair HyperWorks 2017. Manual
- [18] Dassault Systèmes Abaqus 6.14 Manual
- [19] Wang B., Xiong J., Wang X., Ma L., Zhang GQ., Wu LZ., Feng JC.: Energy absorption efficiency of carbon fiber reinforced polymer laminates under high velocity impact, *Materials and Design*, 50, 140-148, 2013.
- [20] Rusell B.P., Liu T., Fleck N.A., Deshpande V.S.: Quasi-Static Three-Point Bending of Carbon Fiber Sandwich Beams With Square Honeycomb Cores, *Journal of Applied Mechanics*, 78(3), 2011.
- [21] https://www.pcb.com/Contentstore/mktgcontent/WhitePapers/WPL_5_Impact.pdf; dostupno 9.3.2020.

PRILOZI

I. CD-R disc