

# Numerički proračun pojednostavljene kompozitne konstrukcije za apsorpciju energije uslijed sudara

---

Pirraku, Zana

Master's thesis / Diplomski rad

2023

*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:235:343880>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-26**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

**Zana Pirraku**

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Darko Ivančević

Student:

Zana Pirraku

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem se mentoru izv. prof. dr. sc. Darku Ivančeviću na stručnoj pomoći, strpljenju za sva moja pitanja i prenesenom znanju za vrijeme pisanja ovog rada. Također se zahvaljujem doc. dr. sc. Lani Virag na pomoći, susretljivosti i korisnim savjetima.

Studiranje je bilo izazovno i uzbudljivo, ali ne bi bilo moguće bez podrške. Zahvaljujem se mami i tati koji su oduvijek najviše navijali na mene. Bez njih ne bih bila danas gdje jesam.

Zana Pirraku



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 23 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 23 -	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Zana Pirraku** JMBAG: 0035205886

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Numerički proračun pojednostavljene kompozitne konstrukcije za apsorpciju energije uslijed sudara**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Numerical analysis of a simplified composite crash structure**

Opis zadatka:

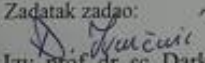
Zbog svojih povoljnih specifičnih mehaničkih svojstava se kompozitni materijali uvelike koriste za izradu dijelova konstrukcije koji služe za zaštitu posade automobila visokih performansi. Kao najbolji primjeri takvih konstrukcija se mogu navesti dijelovi konstrukcije bolida Formule 1 koji preuzimaju energiju prilikom udara (eng. *Crash Structures*). Konstruiranje takvih dijelova, što uključuje odabir kompozitnog materijala i rasporeda slojeva, je vrlo zahtjevno jer bi primjena prevelikih faktora sigurnosti rezultirala prekrutom konstrukcijom kod koje bi se, u slučaju sudara, preveliki iznos energije prenosio na posadu. Zadatak diplomskog rada je numerički proračun pojednostavljene kompozitne konstrukcije koja služi za apsorpciju energije udara.

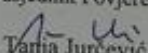
U diplomskom radu je potrebno:

- provesti pregled literature o izvedbama i korištenim materijalima u kompozitnim zaštitnim dijelovima konstrukcije
- izraditi CAD i numerički model pojednostavljene zaštitne konstrukcije
- numeričke simulacije provesti u programu *Abaqus*®
- koristiti dostupne konstitutivne modele kompozitnih materijala i modele oštećivanja, a validaciju provesti usporedbom s dostupnim eksperimentalnim rezultatima ispitivanja udara u višeslojnoj kompozitnoj konstrukciji
- opisati odabrane rubne i početne uvjete korištene u proračunu pojednostavljene zaštitne konstrukcije
- varirati rasporede slojeva s ciljem određivanja utjecaja na apsorpciju energije prilikom sudara.

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

Zadatak zadan: Datum predaje rada: Predviđeni datumi obrane:  
28. rujna 2023. 30. studenoga 2023. 4. – 8. prosinca 2023.

Zadatak zadao:  
  
Izv. prof. dr. sc. Darko Ivančević

Predsjednik Povjerenstva:  
  
Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA .....	V
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY .....	IX
1. UVOD.....	1
1.1. Kompozitni materijali .....	1
1.1.1. Svojstva kompozita .....	1
1.1.2. Proizvodnja kompozita .....	2
1.2. Primjena kompozita .....	3
1.2.1. Zaštitne konstrukcije u vozilima .....	5
2. NUMERIČKO MODELIRANJE UDARNOG OPTEREĆENJA.....	8
2.1. Konstitutivan model kompozitne konstrukcije .....	8
2.1.1. Model oštećenja kompozitne konstrukcije.....	11
2.1.2. Udarno opterećenje .....	13
2.2. Kompozitna konstrukcija opterećena na udarno opterećenje .....	15
2.2.1. Eksperimentalni postav .....	15
2.2.2. Numerički model .....	18
2.2.2.1. Rezultati i zaključak.....	23
3. ZAŠTITNA KONSTRUKCIJA VOZILA OPTEREĆENA UDARNIM OPTEREĆENJEM.....	32
3.1. Teorijske osnove frontalnog sudara vozila i krute barijere .....	34
3.2. <i>Crash test</i> .....	36
4. NUMERIČKO MODELIRANJE ZAŠTITNE KONSTRUKCIJE VOZILA OPTEREĆENE UDARNIM OPTEREĆENJEM .....	38
4.1. Numerički model.....	38
4.1.1. Opis sklopa i materijalni model .....	38
4.1.2. Rubni uvjeti numeričkog modela.....	42
4.1.3. Mreža numeričkog modela i iznos analiziranog vremena .....	43
4.2. Rezultati numeričke simulacije .....	44
4.2.1. Deformirani model.....	44
4.2.2. Analiza ekvivalentnih von Mises naprezanja.....	46
4.2.3. Analiza energija u sustavu .....	49
4.2.4. Oštećenje zaštitne konstrukcije.....	52
5. ZAKLJUČAK.....	56
LITERATURA.....	57

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Označavanje osi ortotropnog materijala [1].....	1
Slika 2. Metode proizvodnje kompozitnih laminata:a) Metoda izrade u mokrom kalupu;.....	3
Slika 3. Staklena, ugljična i aramidna vlakna [3].....	4
Slika 4. Kompozitni dijelovi automobila [6].....	5
Slika 5. Prvi kompozitni automobil [7].....	6
Slika 6. <i>Aston Martin Valkyrie</i> [8] .....	6
Slika 7. Unutrašnjost <i>Aston Martin Valkyrie</i> [8].....	7
Slika 8. Osnovna geometrija ploče u klasičnoj teoriji laminata [10] .....	8
Slika 9. Presjek višeslojne ploče [1].....	9
Slika 10. Sile i momenti u višeslojnom kompozitu [1].....	10
Slika 11. Geometrija testne kompozitne ploče i raspored slojeva [15].....	15
Slika 12. Geometrija udarnih tijela [15].....	16
Slika 13. Testni postav [15].....	17
Slika 14. Površine delaminacija dobivene CT skenom [15] .....	18
Slika 15. Numerički model testnog postava za hemisferično (gore) i ravno udarno tijelo (dolje) .....	19
Slika 16. <i>Shell section</i> kompozitne ploče.....	20
Slika 17. <i>Ply stack plot</i> kompozitne ploče .....	20
Slika 18. Rubni uvjeti testnog postava .....	22
Slika 19. Mreža hemisferičnog udarnog tijela (gore), ravnog udarnog tijela (dolje) i ploče ...	23
Slika 20. Dijagram ovisnosti kontaktne sila o vremenu za energiju udara 10 J.....	24
Slika 21. Dijagram ovisnosti kontaktne sila o vremenu za energiju udara 30 J.....	25
Slika 22. Dijagram ovisnosti kontaktne sile o pomaku za energiju udara 10 J.....	26
Slika 23. Dijagram ovisnosti kontaktne sile o pomaku za energiju udara 30 J.....	26
Slika 24. Ovisnost apsorpcije energije ploče i vremena kontakta za sve mjerene slučajeve ...	28
Slika 25. Hashinov kriterij popuštanja za tlačni lom vlakana za ploču.....	29
Slika 26. Hashinov kriterij popuštanja za tlačni lom matrice za ploču .....	30
Slika 27. <i>Crash structure</i> konstrukcija [17] .....	32
Slika 28. Trajektorije opterećenja pri frontalnom sudaru [17].....	33
Slika 29. Shematska raspodjela apsorpcije energije prednjeg dijela vozila prilikom frontalnog sudara [17].....	33
Slika 30. Frontalni sudar i oštećenje prednjeg dijela vozila [18] .....	34
Slika 31. Frontalni sudar vozila s čvrstom barijerom [17].....	34
Slika 32. Testni postav <i>Crash test-a</i> [20] .....	37
Slika 33. Modelirana zaštitna konstrukcija; 1 – branik, 2 – uzdužni nosači .....	38
Slika 34. Dimenzije modelirane zaštitne konstrukcije (pogled u perspektivi).....	39
Slika 35. <i>Porsche Carrera 911</i> [21].....	39
Slika 36. Sklopni postav numeričke simulacije .....	42
Slika 37. Rubni uvjeti sklopnog postava .....	43
Slika 38. Tijek deformiranja kompozitne zaštitne konstrukcije.....	45
Slika 39. Tijek deformiranja aluminijske zaštitne konstrukcije.....	45
Slika 40. Koncentracije ekvivalentnih von Mises naprezanja [MPa] na zaštitnoj konstrukciji u trenutku $t = 50$ ms.....	46
Slika 41. Raspodjela ekvivalentnih von Mises naprezanja [MPa] po debljini [mm] stijenke za prvu kompozitnu konfiguraciju zaštitne konstrukcije .....	47
Slika 42. Raspodjela ekvivalentnih von Mises naprezanja [MPa] po debljini stijenke [mm] za kompozitnu konfiguraciju zaštitne konstrukcije .....	47

Slika 43. Raspodjela ekvivalentnih von Mises naprezanja [MPa] po debljini [mm] stijenke za kompozitnu konfiguraciju zaštitne konstrukcije .....	48
Slika 44. Raspodjela ekvivalentnih von Mises naprezanja [MPa] po debljini [mm] stijenke za kompozitnu konfiguraciju zaštitne konstrukcije .....	48
Slika 45. Raspodjela ekvivalentnih von Mises naprezanja [MPa] po debljini [mm] stijenke za aluminijsku zaštitnu konstrukciju.....	49
Slika 46. Ovisnost unutarnje energije zaštitne konstrukcije [mJ] o vremenu [s] za sve konfiguracije.....	50
Slika 47. Ovisnost elastične energije deformiranja zaštitne konstrukcije [mJ] o vremenu [s] za sve konfiguracije .....	51
Slika 48. Ovisnost disipirane energije oštećenja zaštitne konstrukcije [mJ] o vremenu [s] za sve konfiguracije .....	51
Slika 49. Ovisnost energije plastične deformacije [mJ] zaštitne aluminijske konstrukcije o vremenu [s].....	52
Slika 50. Raspodjela Hashinovih kriterija inicijacije oštećenja [-] za prvu konfiguraciju kompozita .....	52
Slika 51. Raspodjela Hashinovih kriterija, inicijacije oštećenja [-] za drugu konfiguraciju kompozita .....	53
Slika 52. Raspodjela Hashinovih kriterija inicijacije oštećenja [-] za treću konfiguraciju kompozita .....	53
Slika 53. Raspodjela Hashinovih kriterija inicijacije oštećenja [-] za četvrtu konfiguraciju kompozita .....	54
Slika 54. Raspodjela ekvivalentne plastične deformacije [-] po aluminijskoj konstrukciji .....	55



---

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Mehanička svojstva kompozita MTC510-UD300-HS-33%RW [16] .....	16
Tablica 2. Svojstva za definiciju oštećenja materijala, [16] .....	21
Tablica 3. Raspodjela energije deformabilne ploče za sve mjerene slučajeve.....	27
Tablica 4. Pojava oštećenja na površini ploče.....	31
Tablica 5. Rasporedi slojeva kompozita korištene u simulaciji .....	40
Tablica 6. Materijalna svojstva aluminijske legure, [21] .....	40
Tablica 7. Definiranje ponašanja aluminijske legure u plastičnom području, [21].....	40
Tablica 8. Raspodjela energije zaštitne konstrukcije u krajnjem vremenu simulacije ( $t = 50$ ms) za sve konfiguracije .....	49

**POPIS OZNAKA****Latinične oznake**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
<b>A</b>	N/m	Matrica istežne krutosti
<b>B</b>	N	Matrica spregnute krutosti
<b>C<sub>d</sub></b>	Pa	Matrica elastičnosti nakon popuštanja
<b>D</b>	Nm	Matrica savojne krutosti
<b>D</b>	-	Parameter oštećenja
<b>E</b>	Pa	Modul elastičnosti
<b>E<sub>gp</sub></b>	J	Gravitacijska potencijalna energija
<b>E<sub>k</sub></b>	J	Kinetička energija
<b>E<sub>L,c</sub></b>	J/m <sup>2</sup>	Uzdužna energija loma pri tlačnom popuštanju vlakana
<b>E<sub>L,t</sub></b>	J/m <sup>2</sup>	Uzdužna energija loma pri vlačnom popuštanju vlakana
<b>E<sub>T,c</sub></b>	J/m <sup>2</sup>	Poprečna energija loma pri tlačnom popuštanju matrice
<b>E<sub>T,t</sub></b>	J/m <sup>2</sup>	Poprečna energija loma pri vlačnom popuštanju matrice
<b>F<sub>1c</sub></b>	N	Uzdužna tlačna čvrstoća
<b>F<sub>1t</sub></b>	N	Uzdužna vlačna čvrstoća
<b>F<sub>2c</sub></b>	N	Poprečna tlačna čvrstoća
<b>F<sub>2t</sub></b>	N	Poprečna vlačna čvrstoća
<b>F<sub>4</sub></b>	N	Smična čvrstoća u yz ravnini
<b>F<sub>6</sub></b>	N	Smična čvrstoća u xy ravnini
<b>G</b>	Pa	Modul smicanja
<b>I<sub>Ffc</sub></b>	-	Indeks popuštanja Hashinog kriterija za tlačno popuštanje vlakana
<b>I<sub>Fft</sub></b>	-	Indeks popuštanja Hashinog kriterija za vlačno popuštanje vlakana
<b>I<sub>Fmc</sub></b>	-	Indeks popuštanja Hashinog kriterija za tlačno popuštanje matrice

$I_{Fmt}$	-	Indeks popuštanja Hashinovog kriterija za vlačno popuštanje matrice
$J_1$	kgm <sup>2</sup>	Moment inercije vozila oko vertikalne osi
$N_{ij}$	N	Komponente vektora sila
$M_{ij}$	Nm	Komponente vektora momenata
$\bar{Q}_{ij}$	Pa	Komponente transformirane reducirane matrice elastičnosti
$d_f$	-	Parametar oštećenja vlakana
$d_m$	-	Parametar oštećenja matrice
$d_s$	-	Parametar smičnog oštećenja
$g$	m/s <sup>2</sup>	Akceleracija slobodnog pada
$h$	mm	Debljina/visina
$m$	kg	Masa
$v$	m/s	Vektor brzine
$w$	mm	Progib
$x$	mm	Koordinata trenutnog položaja u smjeru $x$ osi
$y$	mm	Koordinata trenutnog položaja u smjeru $y$ osi

### Grčke oznake

Oznaka	Jedinica	Opis
$\alpha$	-	težinski faktor većeg ili manjeg utjecaja posmičnog naprezanja na lom vlakana
$\beta$	-	Koeficijent restitucije
$\varepsilon_{ij}$	-	Komponente tenzora deformacije
$\varepsilon_{ij}^0$	-	Komponente tenzora deformacije srednje površine laminata
$\kappa_{ij}$	-	Komponente tenzora zakrivljenosti srednje površine laminata
$\mu$	-	Faktor trenja
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Gustoća
$\sigma_{ij}$	Pa	Komponente tenzora naprezanja

---

$\nu$	-	Poissonov koeficijent
$\omega$	s <sup>-1</sup>	Kutna brzina

## POPIS KRATICA

<b>Oznaka</b>	<b>Opis</b>
CDM	<i>Continuum Damage Mechanics</i>
DAMAGEFC	<i>Fiber Compressive Damage Variable</i>
DAMAGEMC	<i>Matrix Compressive Damage Variable</i>
Euro NCAP	<i>The European New Car Assessment Programme</i>
PAN	Poliakrilonitrilna vlakna
PEEQ	<i>Equivalent Plastic Strain</i>
RP	<i>Reference Point</i>
RTM	<i>Resin Transfer Molding</i>

---

**SAŽETAK**

Automobilska industrija na sve načine želi smanjiti masu i povećati sigurnost automobila, a jedna od opcija zamjena je konvencionalnih materijala kompozitima. Kompoziti su materijali na čija se mehanička svojstva može izravno utjecati mijenjanjem konfiguracijom (odnosno kuta usmjerenosti vlakana) i brojem slojeva. Brojna ispitivanja su pokazala pogodnija mehanička svojstva kompozita u odnosu na metal, u vidu krutosti, vlačne čvrstoće, otpornosti na koroziju, zamorne čvrstoće itd.

U sklopu ovog diplomskog rada bilo je potrebno ispitati ponašanje kompozitne konstrukcije opterećene na udarno opterećenje te analizirati apsorpciju energije udara i oštećenje uzrokovano udarom. Udarno opterećenje vrsta je dinamičkog opterećenja kod kojeg se vrijednost sile na tijelo naglo mijenja te se odziv sustava promatra u nekom vremenskom intervalu.

Prvotno je bilo potrebno numerički modelirati kompozitnu konstrukciju opterećenu na udarno opterećenje, za koju postoji analitičko ili eksperimentalno rješenje. Takvim izabranim primjerom iz literature je moguće je validirati numerički postupak. U ovom slučaju modeliran je balistički udar udarnih tijela različite geometrije na kompozitnu ploču.

Nakon što je pokazano da eksperimentalni rezultati odgovaraju onima dobivenima numeričkom simulacijom, bilo je potrebno modelirati pojednostavljenu zaštitnu konstrukciju automobila, eng. *Crash structure*, i podvrgnuti je frontalnom sudaru s krutom barijerom, eng. *Crash test*. Iz provedene simulacije testa bilo je potrebno izvući izlazne podatke o raspodjeli ulazne kinetičke energije u sustav (s naglaskom na apsorpciju energije), o opterećenosti konstrukcije, deformaciji te propagaciji oštećenja.

Ključne riječi: kompozitni materijal, udarno opterećenje, metoda konačnih elemenata, test sudara, zaštitna konstrukcija vozila, propagacija oštećenja, apsorpcija energije

---

**SUMMARY**

The automotive industry is striving to reduce weight and enhance the safety of vehicles in every possible way, and one of the options is substitution of conventional materials with composites. Composites are materials whose mechanical properties can be directly influenced by changing their configuration (specifically the angle of fiber orientation) and the number of layers. Numerous studies have demonstrated more favorable mechanical properties of composites compared to metals, including stiffness, tensile strength, corrosion resistance, fatigue strength, etc.

Within the scope of this Thesis, it was necessary to investigate the behavior of a composite structure subjected to impact loading and analyze the absorption of energy and damage caused by the impact. Impact loading is a type of dynamic loading in which the force on the body changes abruptly, and the system's response is observed over a certain time interval.

Initially, it was necessary to numerically model a composite structure subjected to impact loading for which there is an analytical or experimental solution. By choosing a relevant example from the literature, it is possible to validate the numerical approach. In this case, a ballistic impact of impacting bodies with different geometries on a composite plate was modeled.

After demonstrating that the experimental results correspond to those obtained by numerical simulation, it was necessary to model a simplified protective structure of a car, i.e., a crash structure, and subject it to a frontal collision with a rigid barrier, i.e., a crash test. From the conducted simulation of the test, output data on the distribution of input kinetic energy in the system had to be extracted, with a focus on energy absorption, structural loading, deformation, and damage propagation.

**Keywords:** composite material, impact loading, finite element method, crash test, vehicle crash structure, damage propagation, energy absorption

## 1. UVOD

### 1.1. Kompozitni materijali

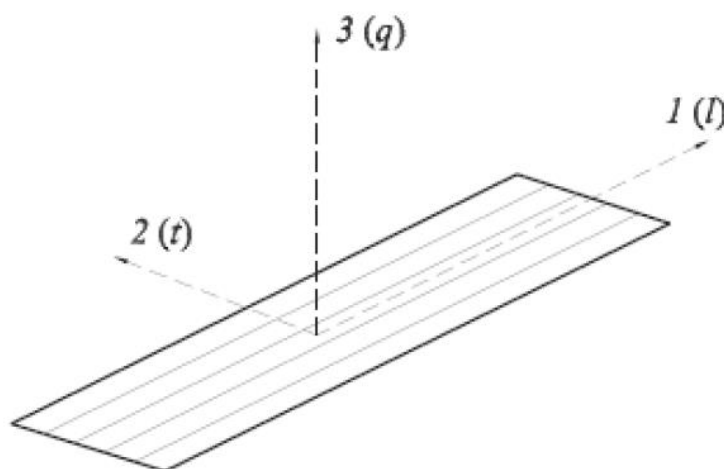
#### 1.1.1. Svojstva kompozita

Kompozitni materijali sastoje se od dvije komponente: matrice i ojačanja u obliku vlakana ili čestica. Pažljivim odabirom tih komponenti i proizvodnog procesa, koji ih spaja u jedinstvenu strukturu, moguće je dobiti specifična tražena svojstva, [1].

Vlakna su nosivi dio kompozita i u najvećoj mjeri utječu na njegovu čvrstoću i krutost, s obzirom da zauzimaju većinu njegovog volumnog udjela – do 70 %. Ona u kompozitu mogu biti ugljična, staklena, aramidna (kevlar) i metalna (silicij, bor, aluminij), [1].

Matrica je u kompozitu prisutna u slojevima i prenosi opterećenja na vlakno, odvaja vlakna jedno od drugog u svrhu sprječavanja širenja pukotina u kompozitu, te formira vanjski oblik kompozitne konstrukcije. Ona može biti polimerna, duromerna, plastomerna, ugljična, metalna i keramička. Svojstva matrice utječu na uzdužnu tlačnu čvrstoću, poprečnu vlačnu čvrstoću i međuslojne posmične čvrstoće. Ovisno o kasnijoj primjeni kompozita, matrica mora biti otporna i na pogonsko gorivo, ulje za podmazivanje, različite kemikalije te visoke temperature (i do 200°C), [1].

Jedna od značajki kompozita je različitost svojstava materijala u određenoj točki duž tri ortogonalne osi. U tom slučaju svaka os ima dvostruku rotacijsku simetriju. To svojstvo čini kompozit ortotropnim materijalom. Zbog toga je potrebno definirati oznake osi u smjeru kojih će se svojstva razmatrati što je prikazano na slici 1., [1].



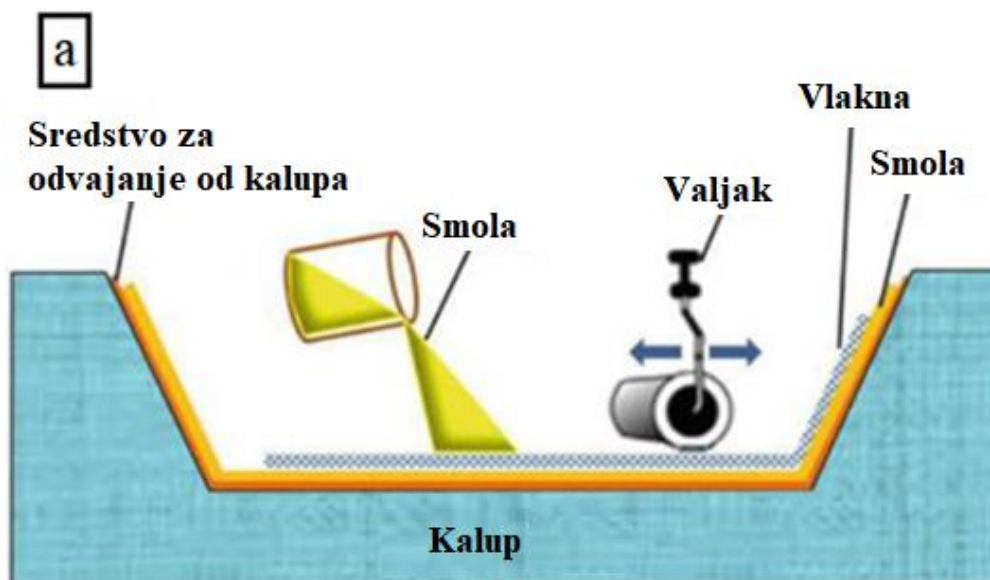
Slika 1. Označavanje osi ortotropnog materijala [1]

Na slici 1. os 1 označava pravac u smjeru vlakana, os 2 označava pravac okomito na smjer vlakana, dok os 3 označava normalu na ravninu u kojoj su vlakna položena, [1].

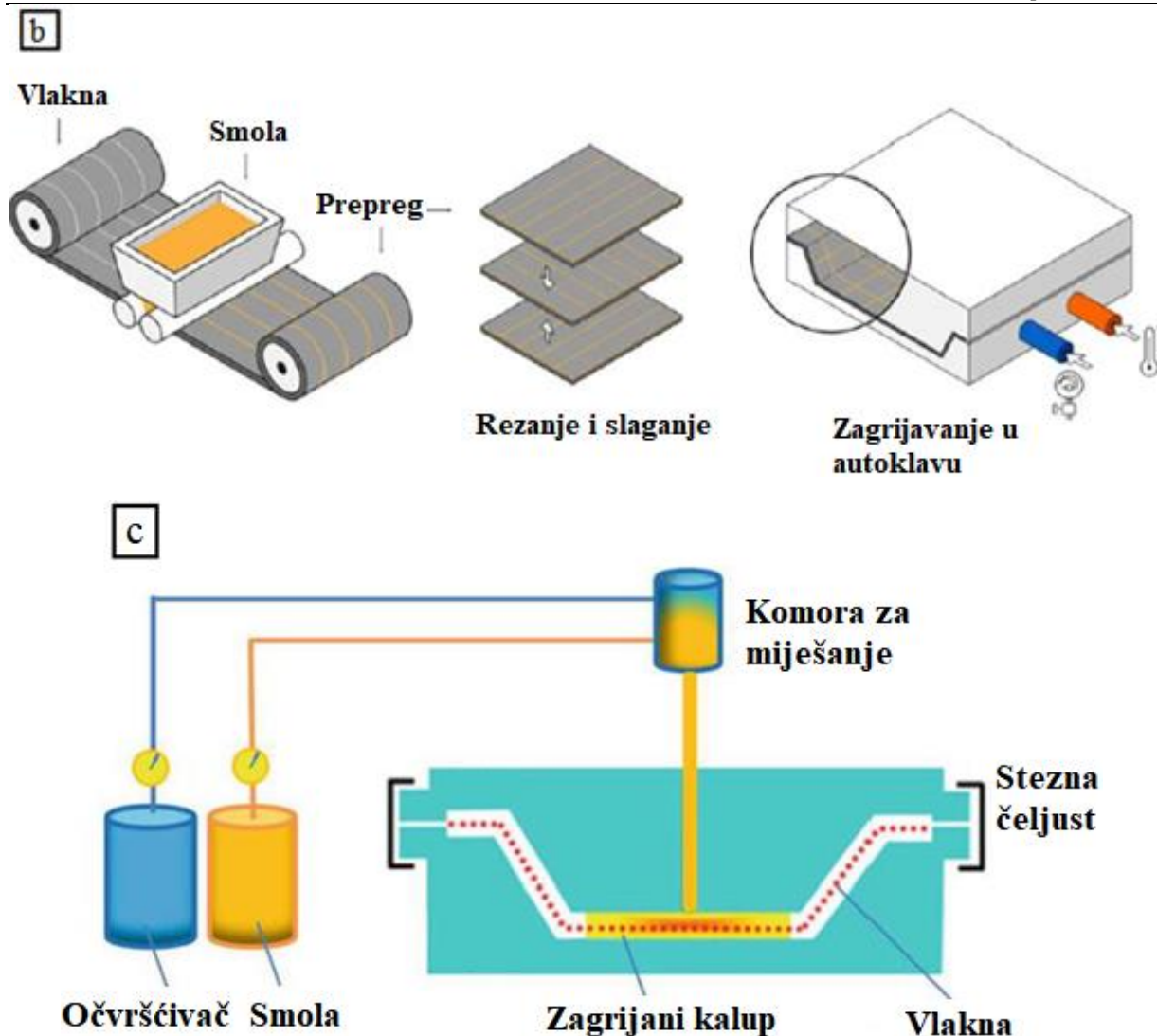
### 1.1.2. *Proizvodnja kompozita*

Cijena, kompliciranost i dugotrajnost proizvodnje kompozita predstavljaju njihovu negativnu stranu. S obzirom da su korišteni kompoziti u ovom diplomskom radu pretpostavljeni kao laminati, samo će i tehnike laminacije biti objašnjene.

Metoda izrade u mokrom kalupu, prikazana na slici 2.(a), najmanje je zahtjevna te najjeftinija. Tijekom te metode proizvodnje vlakna se režu te polažu u kalup, nakon čega su premazana ili prelivena smolom pazeći na ravnomjernu rasprostranjenost slojeva smole. Prepreg laminacija, prikazana na slici 2.(b), s druge strane je preciznija metoda što se tiče kontrole kvalitete. Smola se utiskuje između vlakana, te se tako pred-impregnirane ploče spremaju na hlađenje, nakon kojeg ide izlaganje visokoj temperaturi i tlaku u autoklavu. Ova tehnika je i skuplja od ostalih, stoga se koristi uglavnom za proizvodnju komponenti od kojih se očekuju visoke performanse (zrakoplovna industrija). Treća metoda prikazana na slici 2.(c) zove se eng. *Resin transfer molding* (RTM), a kod nje se suha vlakna umeću u dvodijelni kalup, nakon čega se on zatvara i smola utječe u šupljine pod visokim tlakom. To je visoko automatizirani proces koji se većinom koristi kod masovne proizvodnje, [3].







Slika 2. Metode proizvodnje kompozitnih laminata: a) Metoda izrade u mokrom kalupu; b) Prepreg laminacija; c) Resin transfer molding [2], [3]

## 1.2. Primjena kompozita

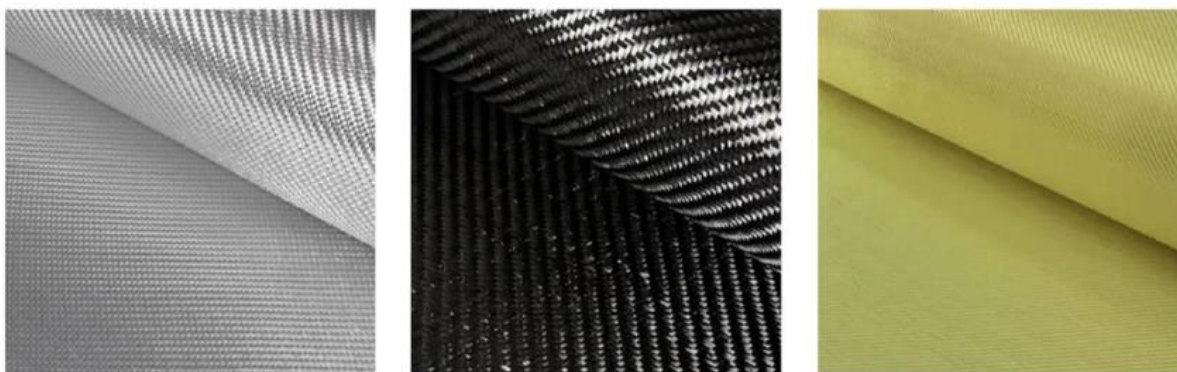
Kompozitni materijali koriste se kod konstrukcija i naprava za koje se postavljaju visoke performanse. U odnosu na čelik imaju veću čvrstoću popraćenu manjom gustoćom. Otporni su na koroziju i mogu biti otporni na različite tvari (prikladnim odabirom matrice), slabo provode toplinu i lako su obradivi. Od vrsta vlakana najviše se koriste staklena, ugljična i aramidna vlakna, a za matricu se koriste smole – epoksidna, poliesterska i vinil esterska, [1].

Ugljična vlakna imaju najveću krutost i vlačnu, tlačnu i savojnu čvrstoću, u odnosu na ostala navedena vlakna. To je i razlog njihove primjene kod najopterećenijih mehaničkih konstrukcija u automobilskoj, zrakoplovnoj i svemirskoj industriji. Ona se proizvode ili iz poliakrilonitril (PAN) vlakana ili iz različitih smola procesom karbonizacije. PAN postupkom proizvode se vlakna s 50 % ugljika, dok se karbonizacijom smola mogu dobiti vlakna i s 80 % ugljika. Vlakna dobivena iz smole imaju veći modul elastičnosti, dok vlakna dobivena PAN postupkom imaju

veću tlačnu i vlačnu čvrstoću na koju najveći utjecaj ima njihova poroznost. S druge strane, ugljična vlakna su skuplja od staklenih i aramidnih vlakana, [1].

Staklena vlakna proizvode se od silicijevog dioksida, i imaju učestalu primjenu kod konstrukcija koje nisu zahtjevno opterećene. Imaju malu gustoću, dobra obradiva svojstva i najjeftinija su od ostalih navedenih vlakana. Staklena vlakna širok su pojam, tako da se često dijele u kategorije; A-staklo – otporno na kemikalije i najsličnije prozorskom staklu (ne apsorbira vlagu, ne hrđa, ne gori, ne skuplja se); C-staklo – otporno na kiseline i lužine; E-staklo – izvrsna električna otpornost; S-staklo – visoka čvrstoća i modul elastičnosti, [1].

Aramidna vlakna su jedina sintetski stvorena vlakna od navedenih. Ona imaju također malu gustoću, dobru kemijsku otpornost, ali imaju i slabija mehanička svojstva u odnosu na staklena vlakna (mala uzdužna tlačna čvrstoća, lošija svojstva u poprečnom smjeru). Uz to su i teže obradiva. Koriste se najviše za proizvodnju vatrootporne zaštitne odjeće (odjela, kacige, rukavice). Na slici 3. prikazana su staklena, ugljična i aramidna vlakna, [1], [3].



**Slika 3. Staklena, ugljična i aramidna vlakna [3]**

Epoksidna smola pripada duromerima i ima najveću čvrstoću i najmanju gustoću u odnosu na ostale navedene smole. Lako se proizvodi i proizvodnja joj nije invazivna za okoliš (mala količina emisije štetnih tvari). S druge strane osjetljiva je na promjene temperature, s obzirom da se pri višim temperaturama ponaša kao gumena (gel) faza, a pri nižim kao staklasta faza. To je karakteristika amorfnih polimera. Iz toga proizlazi niska najviša temperatura pri kojoj se koristi, što joj je jedan od glavnih nedostataka, uz visoku cijenu i veliku krhkost. Epoksidna smola je dvokomponenta, što znači da se osnovna tekuća struktura epoksida miješa s očvršćivačem, iz čega pod utjecajem topline nastaje čvrsta struktura. Nakon skrućivanja postoji opcija i dodavanja plastomera i ostalih aditiva u svrhu smanjenja krhkosti, [1].

Poliesterska smola također pripada duromerima, a nastaje miješanjem nezasićenih poliestera i male količine (do 2 %) katalizatora – metil-etil-keton peroksid. Glavna karakteristika joj je da ima manju čvrstoću i krhkost, i značajna zaostala naprezanja u odnosu na ostale smole. S druge

strane joj je proizvodnja najjeftinija i relativno jednostavna te je otporna na UV zračenje i druga atmosferska djelovanja, [1], [3], [4].

Svojstva vinil estera nalaze se između epoksida i poliestera. Vinil esteri također zahtijevaju katalizator za dobivanje finalne strukture. Postižu bolja mehanička svojstva od poliestera, s proizvodnjom jeftinijom od epoksida. Nisu osjetljivi na promjene temperature te imaju odličnu korozivnu otpornost, [1], [3], [4].

### 1.2.1. Zaštitne konstrukcije u vozilima

Zaštitne konstrukcije u vozilima pogodni su kandidati za izradu od kompozitnih materijala. Razlog tome već su navedena svojstva kompozita, mala gustoća i velika čvrstoća, te dobra apsorpcija energije prilikom udarnog opterećenja. Dijelovi vozila koji se obično izrađuju od kompozita su odbojnici, karoserija, dijelovi motora s unutrašnjim izgaranjem, hauba, krov, dijelovi putničkog prostora i instrumentalne ploče, prtljažni prostor itd., [5].

Na slici 4. prikazani su dijelovi vozila koji bi mogli biti izrađeni od kompozitnog materijala.



Slika 4. Kompozitni dijelovi automobila [6]

Upotreba kompozitnih materijala prvenstveno rezultira smanjenjem mase vozila, a zatim i postizanjem veće akceleracije, smanjenjem specifične potrošnje goriva i emisija štetnih tvari, poboljšanjem aerodinamičkih performansi vozila, jednostavnijom reciklažom dijelova te modernim i upečatljivim dizajnom samog vozila, [5].

Zahtjev za zamjenom čelika, do tada primarnog materijala za konstrukciju vozila nekim drugim, javio se u 40-ima godinama prošlog stoljeća. To će se kasnije pokazati prvom upotrebom kompozitnog materijala za izradu dijelova automobila. *The Soybean Car* američkog proizvođača *Ford Motor Company* sastojao se od karoserije vozila na koje je bilo pričvršćeno četrnaest plastičnih panela kojima su materijalna baza bila soja, kukuruzna i pšenična vlakna

te fenolna smola. Razlozi za zamjenu čelika ovim novotvorenim materijalom bili su nestašica metala uzrokovana Drugim svjetskim ratom, i želja Henryja Forda za povezivanjem agrikulture i automobilske industrije. Na slici 5. prikazan je prvi kompozitni automobil, [7].



**Slika 5. Prvi kompozitni automobil [7]**

Primjer suvremenog kompozitnog vozila je hibridni sportski automobil limitirane proizvodnje *Aston Martin Valkyrie*, prikazan na slikama 6. i 7. Proizveden je 2019. u kolaboraciji britanskih proizvođača vozila *Aston Martin* i *Red Bull Racing Advanced Technologies*. Karakteristika ovog automobila je da ne sadrži nijedan čelični dio – i interijer i eksterijer su mu u potpunosti proizvedeni primjenom kompozita s ugljičnim vlaknima, [8].



**Slika 6. Aston Martin Valkyrie [8]**





**Slika 7. Unutrašnjost Aston Martin Valkyrie [8]**

## 2. NUMERIČKO MODELIRANJE UDARNOG OPTEREĆENJA

U sklopu ovog diplomskog rada bilo je potrebno izraditi model višeslojne kompozitne konstrukcije za slučaj udarnog opterećenja, za koji postoje eksperimentalni podaci, s ciljem validacije numeričke procedure.

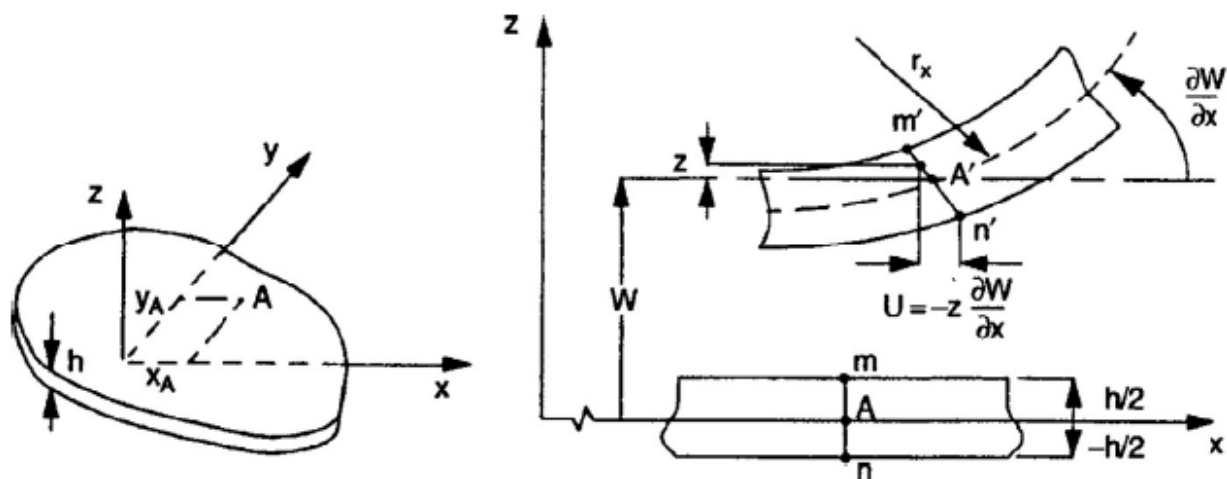
### 2.1. Konstitutivan model kompozitne konstrukcije

U svrhu ispravne validacije numeričke procedure, potrebno je bilo postaviti reprezentativan konstitutivan model za vlaknima ojačane kompozitne materijale i konstrukcije, koji bi uzeo u obzir njihov mehanički odziv prije inicijacije oštećenja, predviđanje inicijacije oštećenja te modeliranje propagacije oštećenja, [9].

Kompozitne konstrukcije uglavnom se izvode kao laminati, odnosno višeslojne tankostijene konstrukcije u kojoj pojedini slojevi mogu biti postavljeni pod različitim postavnim kutovima s ciljem ostvarenja željene krutosti i čvrstoće.

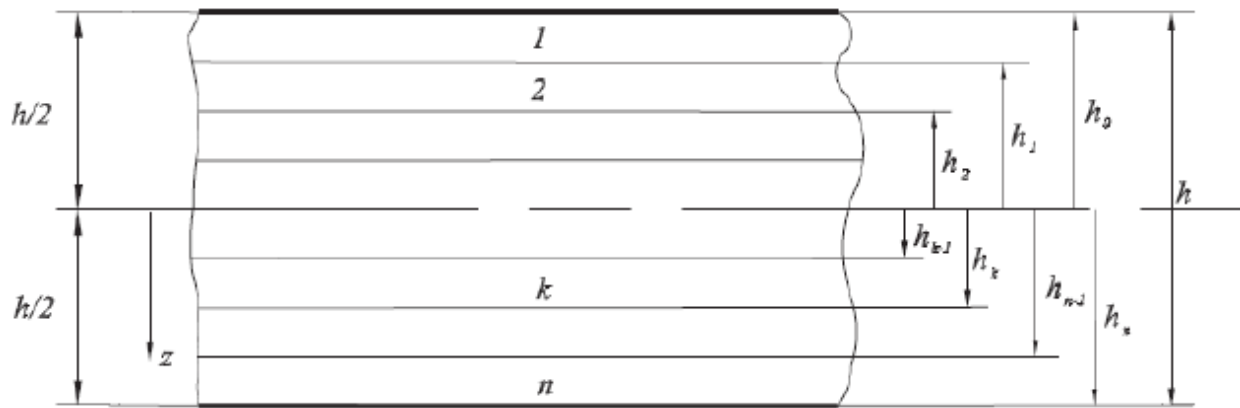
Numeričko modeliranje kompozita zasnovano je na klasičnoj teoriji laminata. Teorija laminata počiva na makromehanici kompozita, to jest na načinu računanja tenzora naprezanja i deformacija, te iz njih sila i momenata, pojedinačno po slojevima, što u konačnici određuje mehaničko ponašanje cijele kompozitne konstrukcije. Pri tome je potrebno znati mehanička svojstva pojedinih slojeva, debljinu te usmjerenost vlakana, [1], [10].

Na slici 8. prikazana je geometrija ploče iz koje proizlaze osnovne pretpostavke spomenute teorije, [9].



Slika 8. Osnovna geometrija ploče u klasičnoj teoriji laminata [10]

Ravnina  $xy$  podudara se sa srednjom površinom ploče. Presjek višeslojne ploče prikazan je na slici 9.



Slika 9. Presjek višeslojne ploče [1]

Osnovne pretpostavke klasične teorije laminata glase:

- i) Savijanje srednje ravnine ploče malo je u usporedbi s debljinom ploče  $h$ , i progib ploče  $w$  je pri tome mali;
- ii) Slojevi su u stanju ravninskog naprezanja;
- iii) Presjeci koji su prije deformiranja ravni i okomiti na srednju ravninu ostaju ravni i okomiti na srednju ravninu i nakon savijanja. Pretpostavlja se da su smične deformacije  $\gamma_{xz}$  i  $\gamma_{yz}$  zanemarive;
- iv) Pretpostavlja se da vrijedi uvjet  $\sigma_z = 0$ , osim u lokaliziranim područjima gdje su visoke koncentracije poprečnog opterećenja;
- v) Nema klizanja među slojevima;
- vi) Pomaci u ravnini slojeva linearna su funkcija koordinate  $z$ , [1], [9].

Ove pretpostavke poznate su kao Kirchhoffova hipoteza za tanke ploče i ljuske, s obzirom da se kod debljih ploča ne zanemaruju posmična naprezanja, [9].

Veza između komponenti tenzora naprezanja glasi:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \text{sim.} & & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix}, \quad (2.1)$$

gdje su:

$\sigma_{ij}$  – komponente tenzora naprezanja u globalnom koordinatnom sustavu,

$\bar{Q}_{ij}$  – komponente reducirane matrice elastičnosti u globalnom koordinatnom sustavu,

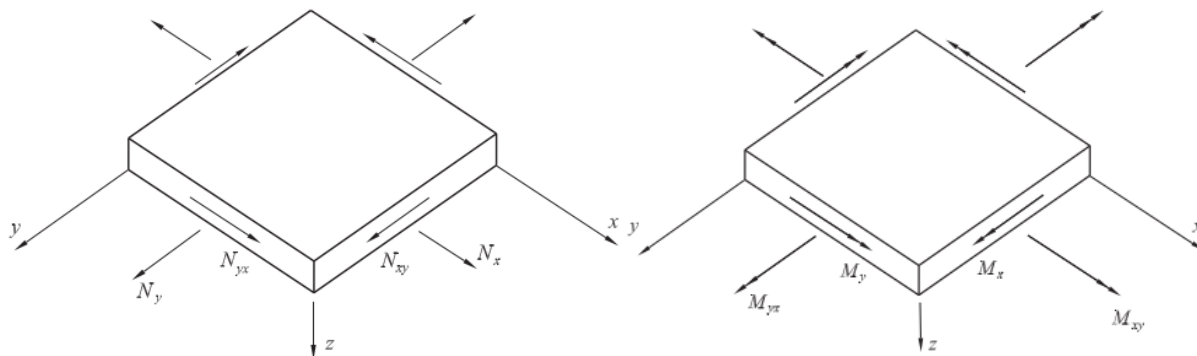
$\varepsilon_{ij}$  – komponente tenzora deformacije u globalnom koordinatnom sustavu.

Tenzor deformacija definiran je kao:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \varepsilon_s^0 \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix}, \quad (2.2)$$

gdje se veličine s indeksom <sup>0</sup> odnose na deformaciju srednje površine laminata, dok je  $\kappa$  veličina koja definira zakrivljenost srednje površine laminata.

Sile i momenti u višeslojnom kompozitu definirani su kao na slici 10.



Slika 10. Sile i momenti u višeslojnom kompozitu [1]

Izrazi za sile i momente prema slici 10. glase:

$$N_{ij} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_{ij} dz, \quad (2.3)$$

$$M_{ij} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_{ij} z dz. \quad (2.4)$$

Ako se jednadžbe (2.1) i (2.2) uvrste u jednadžbu (2.3) dobije se izraz:

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} &= \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix}_k dz = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \text{sim.} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ & & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \varepsilon_s^0 \end{Bmatrix} dz + \\ &+ \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \text{sim.} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ & & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_s \end{Bmatrix} z dz. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Daljnijm sređivanjem izraza dobije se:

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^n \bar{\mathbf{Q}}_k \varepsilon^0 \int_{h_{k-1}}^{h_k} dz + \sum_{k=1}^n \bar{\mathbf{Q}}_k \kappa \int_{h_{k-1}}^{h_k} z dz, \quad (2.6)$$

$$\mathbf{N} = \left( \sum_{k=1}^n \bar{\mathbf{Q}}_k z \Big|_{h_{k-1}}^{h_k} \right) \varepsilon^0 + \left( \sum_{k=1}^n \bar{\mathbf{Q}}_k \frac{z^2}{2} \Big|_{h_{k-1}}^{h_k} \right) \kappa, \quad (2.7)$$

$$\mathbf{N} = \mathbf{A} \varepsilon^0 + \mathbf{B} \kappa. \quad (2.8)$$



Matrice **A** i **B** predstavljaju isteznu i spregnutu krutost, a definirane su kao:

$$\mathbf{A} = \sum_{k=1}^n \bar{\mathbf{Q}}_k (h_k - h_{k-1}), \quad (2.9)$$

$$\mathbf{B} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \bar{\mathbf{Q}}_k (h_k^2 - h_{k-1}^2). \quad (2.10)$$

Ako se jednadžbe (2.1) i (2.2) uvrste u jednadžbu (2.4) dobije se izraz:

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} &= \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix}_k dz = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \text{sim.} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ & & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \varepsilon_s^0 \end{Bmatrix} dz + \\ &+ \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \text{sim.} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ & & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_s \end{Bmatrix} z^2 dz. \end{aligned} \quad (2.11)$$

Daljnijm sređivanjem izraza dobije se:

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^n \bar{\mathbf{Q}}_k \varepsilon^0 \int_{h_{k-1}}^{h_k} dz + \sum_{k=1}^n \bar{\mathbf{Q}}_k \kappa \int_{h_{k-1}}^{h_k} z^2 dz, \quad (2.12)$$

$$M = \left( \sum_{k=1}^n \bar{\mathbf{Q}}_k \frac{z^2}{2} \Big|_{h_{k-1}}^{h_k} \right) \varepsilon^0 + \left( \sum_{k=1}^n \bar{\mathbf{Q}}_k \frac{z^3}{3} \Big|_{h_{k-1}}^{h_k} \right) \kappa, \quad (2.13)$$

$$M = \mathbf{B} \varepsilon^0 + \mathbf{D} \kappa. \quad (2.14)$$

Matrica **D** predstavlja savojnu krutost, a definirana je kao:

$$\mathbf{D} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n \bar{\mathbf{Q}}_k (h_k^3 - h_{k-1}^3). \quad (2.15)$$

Nakon uvođenja svih zamjena, konstitutivna jednadžba višeslojnih kompozita glasi, [1]:

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{B} & \mathbf{D} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon^0 \\ \kappa \end{Bmatrix}. \quad (2.16)$$

Iz ranije prikazanih izraza vidljivo je da uzdužne i poprečne sile te momenti savijanja u slojevima laminata ovise o debljini slojeva, matrici elastičnosti, deformaciji i zakrivljenosti srednje površine laminata te o mjestu na poprečnom presjeku za koji su izračunati.

### 2.1.1. Model oštećenja kompozitne konstrukcije

Oštećenje materijala predstavlja fizikalni proces degradacije krutosti materijala koji dovodi do njegova popuštanja to jest gubitka nosivosti. Mehanika oštećenja kontinuuma (eng. *Continuum Damage Mechanics* - CDM) pruža teorijske osnove za modeliranje inicijacije i progresije oštećenja te degradaciju krutosti. Primjenjuje se na razini slojeva i predlaže matematičke modele popuštanja kompozitnog materijala koji pokušavaju predvidjeti popuštanje konstrukcije uslijed određenih uvjeta opterećenja. Načini popuštanja kompozitnih materijala mogu se

manifestirati kao lom matrice, lom vlakana, izvlačenje vlakana ili delaminacija (odvajanje slojeva), [1], [9].

Nedostaci ovakvog pristupa su u tome što je često obuhvaćen samo linearno elastičan konstitutivan model prije inicijacije oštećenja, prikladan za modeliranje elastično krhkih kompozita, kod kojih nije primijećeno nelinearno ponašanje prije inicijacije oštećenja. Ovakvi modeli nisu primjenjivi u opisivanju plastičnog ponašanja nekih termoplastičnih kompozita podvrgnutima smičnom ili poprečnom opterećenju, [9].

U ovom radu razmatrat će se samo Hashinov kriterij popuštanja, s obzirom da je njegov matematički model jedini dostupan u *Abaqus* softverskom paketu, pomoću kojeg su izrađene numeričke simulacije, [11].

Hashinov kriterij popuštanja obuhvaća četiri načina popuštanja; i) vlačni lom vlakana, ii) tlačni lom vlakana, iii) vlačni lom matrice, iv) tlačni lom matrice; a njih opisuju slijedeće jednadžbe [11]:

$$I_{Fft}^2 = \left(\frac{\sigma_1}{F_{1t}}\right)^2 + \alpha \left(\frac{\sigma_6}{F_6}\right)^2 \quad \sigma_1 \geq 0, \quad (2.17)$$

$$I_{Ffc}^2 = \left(\frac{\sigma_1}{F_{1c}}\right)^2 \quad \sigma_1 < 0, \quad (2.18)$$

$$I_{Fmt}^2 = \left(\frac{\sigma_2}{F_{2t}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_6}{F_6}\right)^2 \quad \sigma_2 \geq 0, \quad (2.19)$$

$$I_{Fmc}^2 = \left(\frac{\sigma_2}{2F_4}\right)^2 + \left[\left(\frac{F_{2c}}{2F_4}\right)^2 - 1\right] \frac{\sigma_2}{F_{2c}} + \left(\frac{\sigma_6}{F_6}\right)^2 \quad \sigma_2 < 0, \quad (2.20)$$

gdje su:

$I_{Fft}$  – Indeks popuštanja Hashinovog kriterij za vlačni lom vlakana,

$I_{Ffc}$  – Indeks popuštanja Hashinovog kriterij za tlačni lom vlakana,

$I_{Fmt}$  – Indeks popuštanja Hashinovog kriterij za vlačni lom matrice,

$I_{Fmc}$  – Indeks popuštanja Hashinovog kriterij za vlačni lom matrice,

$\alpha$  – težinski faktor većeg ili manjeg utjecaja posmičnog naprezanja na lom vlakana,

$F_{1t}$  – uzdužna vlačna čvrstoća,

$F_{1c}$  – uzdužna tlačna čvrstoća,

$F_{2t}$  – poprečna vlačna čvrstoća,

$F_{2c}$  – poprečna tlačna čvrstoća,

$F_4$  – smična čvrstoća u yz ravnini,

$F_6$  – smična čvrstoća u  $xy$  ravnini.

Vrijednosti Hashinovih varijabli u izlaznim podacima analitičkog ili numeričkog proračuna postižu vrijednosti između 0 i 1. Nakon inicijacije oštećenja slijedi propagacija oštećenja po CDM modelu, kod koje reduciranu matricu elastičnosti iz izraza (2.1) zamjenjuje matrica elastičnosti nakon popuštanja  $\mathbf{C}_d$ . Izraz (2.1) u tom slučaju glasi:

$$\sigma = \mathbf{C}_d \varepsilon, \quad (2.21)$$

gdje je izraz za matricu elastičnosti nakon popuštanja:

$$\mathbf{C}_d = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} (1 - d_f)E_1 & (1 - d_f)(1 - d_m)v_{21}E_1 & 0 \\ (1 - d_f)(1 - d_m)v_{12}E_2 & (1 - d_m)E_2 & 0 \\ 0 & 0 & (1 - d_s)GD \end{bmatrix}, \quad (2.22)$$

a ostale varijable znače:

$D$  – parametar oštećenja,

$d_f$  – parametar oštećenja (vlačnog ili tlačnog) vlakana,

$d_m$  – parametar oštećenja (vlačnog ili tlačnog) matrice,

$d_s$  – parametar smičnog oštećenja.

Izrazi za spomenuta oštećenja glase:

$$D = 1 - (1 - d_f)(1 - d_m)v_{12}v_{21}, \quad (2.23)$$

$$d_f = \begin{cases} d_f^t & \sigma_1 \geq 0, \\ d_f^c & \sigma_1 < 0, \end{cases} \quad (2.24)$$

$$d_m = \begin{cases} d_m^t & \sigma_2 \geq 0, \\ d_m^c & \sigma_2 < 0, \end{cases} \quad (2.25)$$

$$d_s = 1 - (1 - d_f^t)(1 - d_f^c)(1 - d_m^t)(1 - d_m^c). \quad (2.26)$$

### 2.1.2. Udarno opterećenje

Udarno opterećenje je vrsta dinamičkog opterećenja kojem je karakteristika nagla promjena opterećenja koje djeluje na konstrukciju, a uobičajeni slučaj bio bi sudar dvaju tijela. U usporedbi sa statičkim opterećenjem, koje je dovoljno sporo da se ne javljaju inercijske sile te je u numeričkim proračunima (za materijale linearno-elastičnog ponašanja) dovoljno pratiti isključivo krajnji trenutak u kojem je tijelo u potpunosti opterećeno, kod dinamičkog opterećenja odziv je promjenjiv u vremenu. To znači da je prilikom proračuna konstrukcija koje su dinamički opterećene potrebno promatrati ukupno vrijeme u dovoljno malim inkrementima. Promatrana izlazna veličina kod statičkog opterećenja je samo pomak, dok

dinamičko opterećenje rezultira pomakom, brzinom, akceleracijom, te pojavom vibracija. U realnim situacijama dinamičko opterećenje učestalije je od statičkog, [12].

Točan analitički proračun naprezanja nastalih od udarnog opterećenja nije jednostavan jer ima osnovu u proučavanju složenih (i nekad nemjerljivih) fizikalnih pojava, npr. raspodjela naprezanja na mjestu kontakta dva tijela; analiza širenja valova naprezanja; trenje; disipaciju mehaničke energije, itd. [12]

Za vrijeme udara u elastičnom tijelu dolazi do nastanka valova naprezanja koji se šire različitim brzinama, a ponašaju analogno ponašanju valova u optici ili hidrodinamici; dilatacijski val (val normalnih naprezanja) uzrokuje približavanje i udaljšavanje čestica, i distorzijski val (val posmičnog naprezanja) uzrokuje promjenu oblika, dok obujam ostaje isti, Kod realnih tijela (geometrije konačnih dimenzija) prisutne su refleksija i interferencija valova naprezanja (potencijalno značajno povećanje naprezanja), te nastajanje površinskih (Rayleighovih) i interaktivnih normalno-posmičnih valova naprezanja, [12].

Prilikom analize udara dva tijela pretpostavka je da je objekt koji udara u elastično deformabilno tijelo (udarno tijelo) kruto. Ne analiziraju se kontaktna naprezanja u blizini mjesta udara tijela, valovi naprezanja, gubitak energije zbog unutarnjeg trenja te masa elastičnog tijela. Pojednostavljeni proračun omogućava relativno dobru procjenu reda veličine maksimalnih naprezanja, deformacija i pomaka. To je i dokazano u završnom radu [13], u kojem su se analitički dobiveni progibi i naprezanja, zglobno oslonjene elastične grede na koju pada kruto tijelo s određene visine, zadovoljavajuće poklopili s numeričkim rezultatima.

S obzirom na veći broj veličina koje se moraju uzeti u obzir prilikom njegova proračuna, dinamičko opterećenje uglavnom se računa pomoću numeričkih softvera. U svrhu izrade ovog rada korišten je softver *Abaqus*.

*Abaqus* je softver koji metodom konačnih elemenata izračunava različite probleme iz područja čvrstoće, termodinamike, fluida itd. Dva glavna rješavača softvera, koji određuju način izračuna problematike, su *Abaqus/Standard* i *Abaqus/Explicit*.

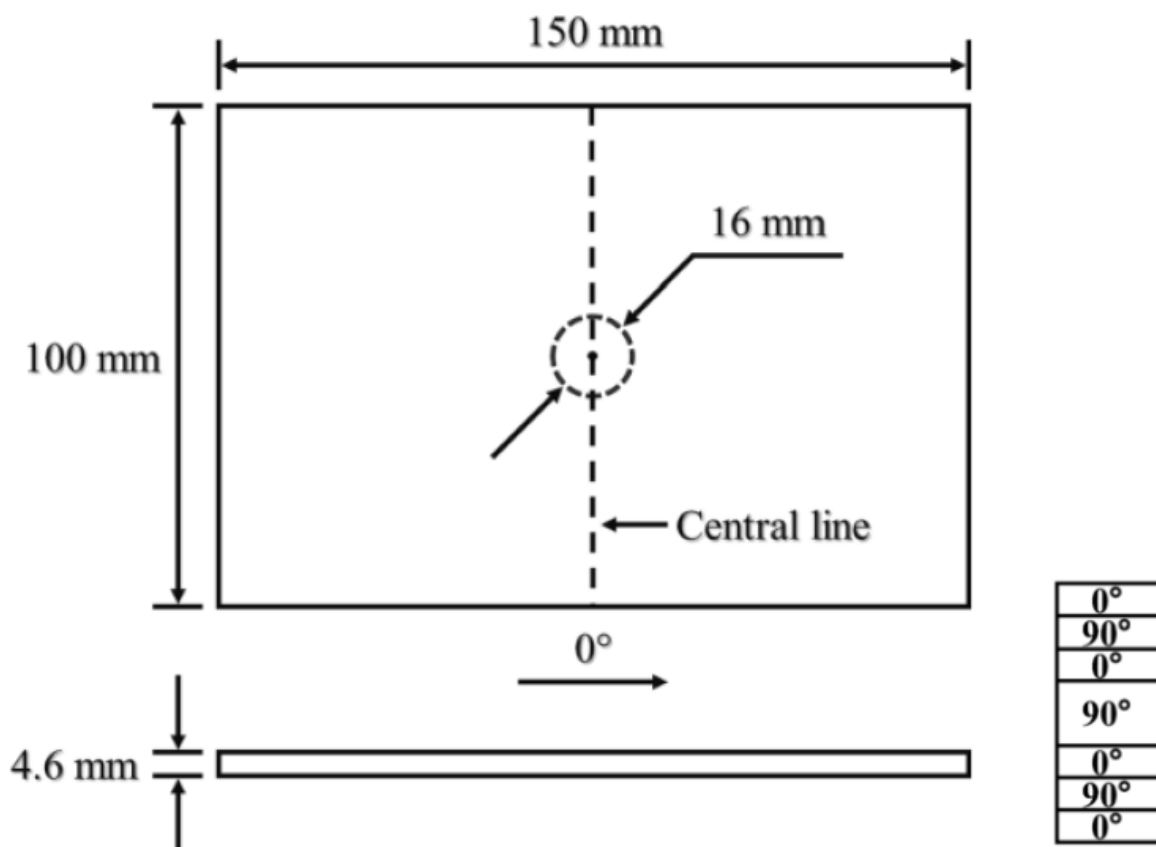
*Abaqus/Standard* ima uglavnom primjenu u nelinearno statičkim i linearno dinamičkim problemima, modelima prijenosa topline, te akustici, dok se *Abaqus/Explicit* koristi za rješavanje nelinearnih dinamičkih problema, kao što su balistički udari, automobilski testovi sudara, *drop* testovi elektroničkih komponenti te nelinearni problemi kontakta dva tijela pri kojima se generira energija apsorpcije ili kohezivni kontakt. Moguće je i kombiniranje modula pri čemu simulacija započinje linearno te u nekoj točki prelazi u nelinearno područje, [14].

## 2.2. Kompozitna konstrukcija opterećena na udarno opterećenje

Za validaciju numeričke procedure u ovom slučaju odabran je znanstveni rad [15] u kojem su mjereni pomaci i sila udara tijekom balističkog udara dvije različite geometrije krutog udarnog tijela na nepomičnu kompozitnu ploču. U radu su korištene različite energije udara (10, 15, 20, 25 i 30 J) definirane visinom s koje tijelo pada, odnosno brzinom udara. Za validaciju odabrani su mjereni slučajevi: hemisferna i ravna geometrija udarnog tijela pri energijama udara od 10 J i 30 J.

### 2.2.1. Eksperimentalni postav

Testni uzorak je pred-impregnirana kompozitna ploča (60 % volumni udio ugljičnih vlakana, 40 % volumni udio epoksidna matrica), čiji su slojevi posloženi u raspored slojeva  $[0_2/90_2]_{2s}$ . To znači da je poredano šesnaest slojeva jedan na drugoga, s dvije različite usmjerenosti vlakana (okomite jedna na drugu). Geometrija testnog uzorka i orijentacija globalnog koordinatnog sustava su prikazani na slici 11., a mehanička svojstva kompozita od kojeg je ploča izrađena dana su u tablici 1., [15].



Slika 11. Geometrija testne kompozitne ploče i raspored slojeva [15]

Tablica 1. Mehanička svojstva kompozita MTC510-UD300-HS-33%RW [16]

Svojstvo	Vrijednost
$E_1$	122 GPa
$E_2$	8,5 GPa
$\nu_{12}$	0,25
$G_{12}$	5,2 GPa
$G_{13}$	5,2 GPa
$G_{23}$	3,13 GPa
$\rho$	1570 kg/m <sup>3</sup>

Takva kompozitna ploča je proizvedena zagrijavanjem u autoklavu, u uvjetima konstantne temperature od 110 °C i tlaka 6 bara u vremenskom periodu od 120 minuta, nakon čega se ohladila do sobne temperature brzinom hlađenja od 2 °C po minuti. Nominalna debljina panela bila je 4,6 mm, te su od njih izrezani testni uzorci dimenzija 150 x 100 mm. Na slici 11. prikazane su i dimenzije testnih uzoraka, [15].

Udarno tijelo hemisferične geometrije izrađeno je od nehrđajućeg čelika mase 5,265 kg. Udarno tijelo ravne geometrije kontakta od istog je materijala, a masa mu iznosi 2,255 kg. Njihove geometrije definirane su na slici 12.



Slika 12. Geometrija udarnih tijela [15]

Na slici 11. je prikazana i pozicija udarnog tijela s obzirom na ploču. Geometrija i svojstva udarnog tijela proizlaze iz uvjeta da udarač bude što krući, to jest da ne dođe do njegovog deformiranja pri udaru, s ciljem da se kinetička energija udarača pretvara isključivo u unutarnju energiju ploče za vrijeme njihovog kontakta. Zato je u tijelu metka sadržana velika masa s obzirom na njegove dimenzije, [15].

Eksperimentalni postav je prikazan je na slici 13. On se sastoji od uređaja koji simulira slobodni pad te na taj način osigurava određenu energiju udara. S obzirom da se radi o slobodnom padu iz stanja mirovanja, izraz za gravitacijsku potencijalnu energiju glasi:

$$E_{gp} = mgh, \quad (2.27)$$

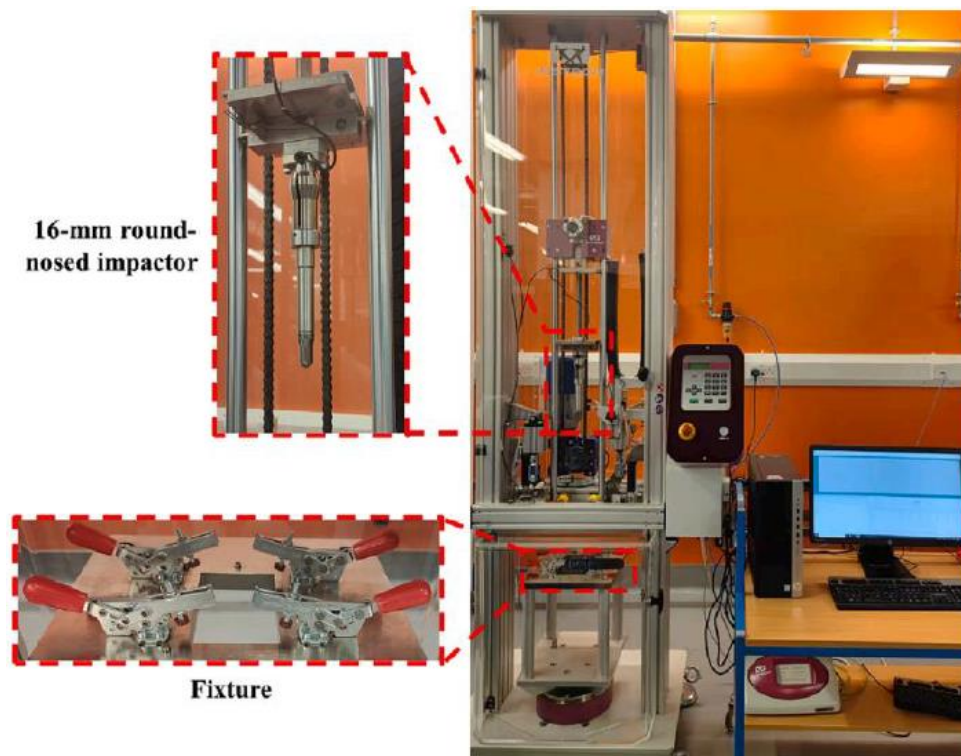
pri čemu je  $m$  masa udarnog tijela,  $g$  akceleracija slobodnog pada i  $h$  visina s koje tijelo pada. Iz njega se lako može dobiti visina s koje će se ispustiti udarno tijelo određene geometrije, koje bi energijom od 10 ili 30 J udarilo od ploču:

$$h_{10,hem} = \frac{E}{mg} = \frac{10}{5,265 \cdot 9,80665} = 0,194 \text{ m}, \quad (2.28)$$

$$h_{30,hem} = \frac{E}{mg} = \frac{30}{5,265 \cdot 9,80665} = 0,581 \text{ m}, \quad (2.29)$$

$$h_{10,rav} = \frac{E}{mg} = \frac{10}{5,255 \cdot 9,80665} = 0,194 \text{ m}, \quad (2.30)$$

$$h_{30,rav} = \frac{E}{mg} = \frac{30}{5,255 \cdot 9,80665} = 0,582 \text{ m}. \quad (2.31)$$

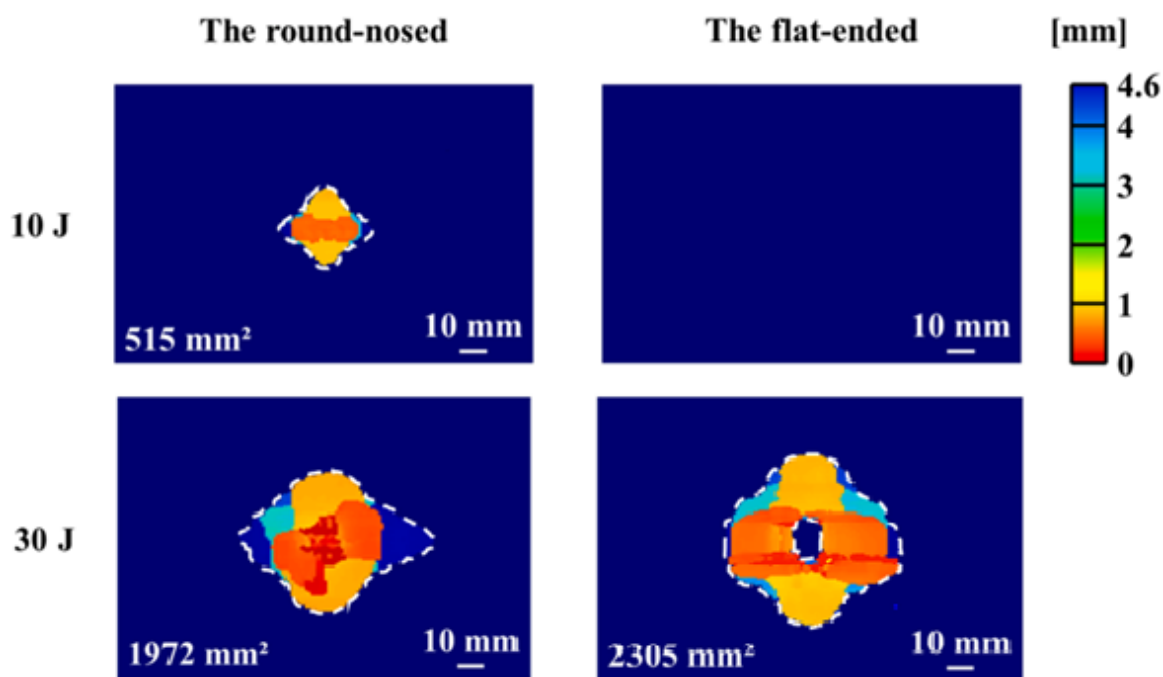


Slika 13. Testni postav [15]

Testni kompozitni uzorak ukliješten je na donjem dijelu ploče. Testni je uređaj opremljen sustavom za prikupljanje podataka koji je povezan s fotoelektričnim senzorom te komorom u kojoj se odvija slobodni pad, kao što je prikazano na slici 13. Na ovaj način uređaj mjeri udarnu brzinu, udarno opterećenje te maksimalni pomak uzorka tijekom vremena, [15].

Kada ispušteno udarno tijelo prođe pored senzora, sustav za prikupljanje podataka počinje mjeriti vrijeme koje će biti potrebno tijelu da dođe od senzora do ploče. Iz tog vremena, i udaljenosti između senzora i ploče, izračunava se udarna brzina. Izlazni podaci o udarnom opterećenju počinju se generirati tek od trenutka kontakta, odnosno udara, a iz njih se izračunom dobiva pomak, [15].

Nakon udara kompozitne ploče bile su pregledane ultrasoničnim skenerom u svrhu pronalaska oštećenja kompozita. Zaključeno je da je u primjeru hemisferičnog udarnog tijela do delaminacije došlo čak i pri najmanjoj energiji udara, dok je za udarno tijelo koje ima ravnu površinu udara za pojavu delaminacije bila potrebna energija udara od minimalno 25 J. Osim toga, detaljnijom analizom zabilježeno je i pucanje matrice te izvlačenje vlakana za energije udara 25 i 30 J. Na slici 14. prikazane su veličine površina delaminacije dobivenih CT skenom, za energije udara 10 i 30 J, za obje geometrije udarnog tijela, [15].



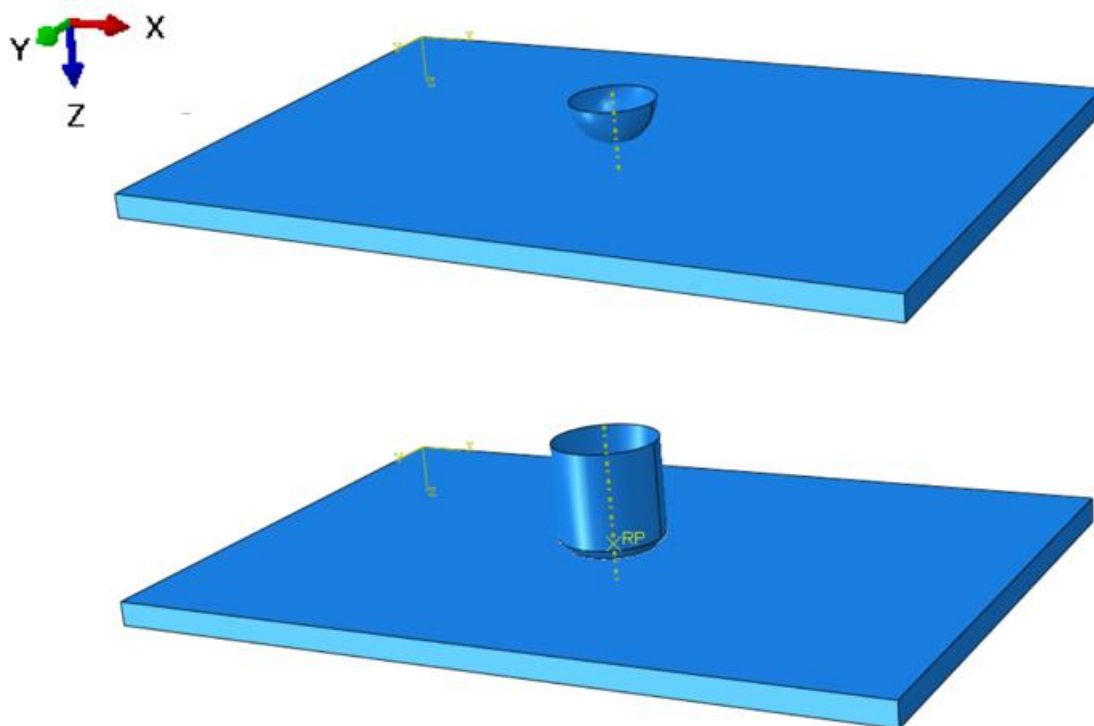
Slika 14. Površine delaminacija dobivene CT skenom [15]

### 2.2.2. Numerički model

Numerička analiza provedena je u programu *Abaqus/Explicit* zbog svih ranije objašnjenih razloga koji odgovaraju ovom testnom postavi.



Za početak napravljeni su modeli kompozitne ploče i udarnih tijela, što je prikazano na slici 15.



**Slika 15. Numerički model testnog postava za hemisferično (gore) i ravno udarno tijelo (dolje)** Materijal nepomične ploče modeliran je kao ortotropan materijal u stanju ravninskog naprezanja (tip *Lamina*), što je prikladan način za definiranje ploče izrađene od različito orijentiranih slojeva. Kako bi materijal mogao biti definiran kao *Lamina*, moraju vrijediti jednakosti:

$$E_1, E_2, G_{12}, G_{13}, G_{23} > 0, \quad (2.32)$$

$$|\nu_{12}| < \left(\frac{E_1}{E_2}\right)^{1/2}. \quad (2.33)$$

Uvrštavanjem vrijednosti iz tablice 1. u jednadžbu (2.33) dobije se:

$$|0.25| < \left(\frac{122}{8.5}\right)^{1/2} = 3,79, \quad (2.34)$$

te se dolazi do zaključka da se materijal iz tablice 1. može modelirati kao *Lamina*.

Ovakav način modeliranja kompozita zahtijeva korištenje ljuskastih (*Continuum shell*) elemenata, što se i poklapa s geometrijom ploče – duljina i širina puno su veće od debljine. Oni se modeliraju na način da se prvo izmodelira *solid* geometrija kojoj se zatim zadaje *shell* presjek. Ljuskasti presjek zadan je kao na slici 16. Iz nje je vidljivo da je zadan raspored šesnaest slojeva debljine 0,2875 mm. Na slici 17. priložena je i vizualizacija orijentacije kompozitnih slojeva po presjeku. Ovakav *Ply stack* plot može poslužiti kao provjera ispravne zadanosti

presjeka i orijentiranosti materijala (debljina materijala mora se raspoređivati u smjeru normale na plohu).

Name: Section-1-SET-15  
 Type: Shell / Continuum Shell, Composite

Section integration:  During analysis  Before analysis

Layup name:

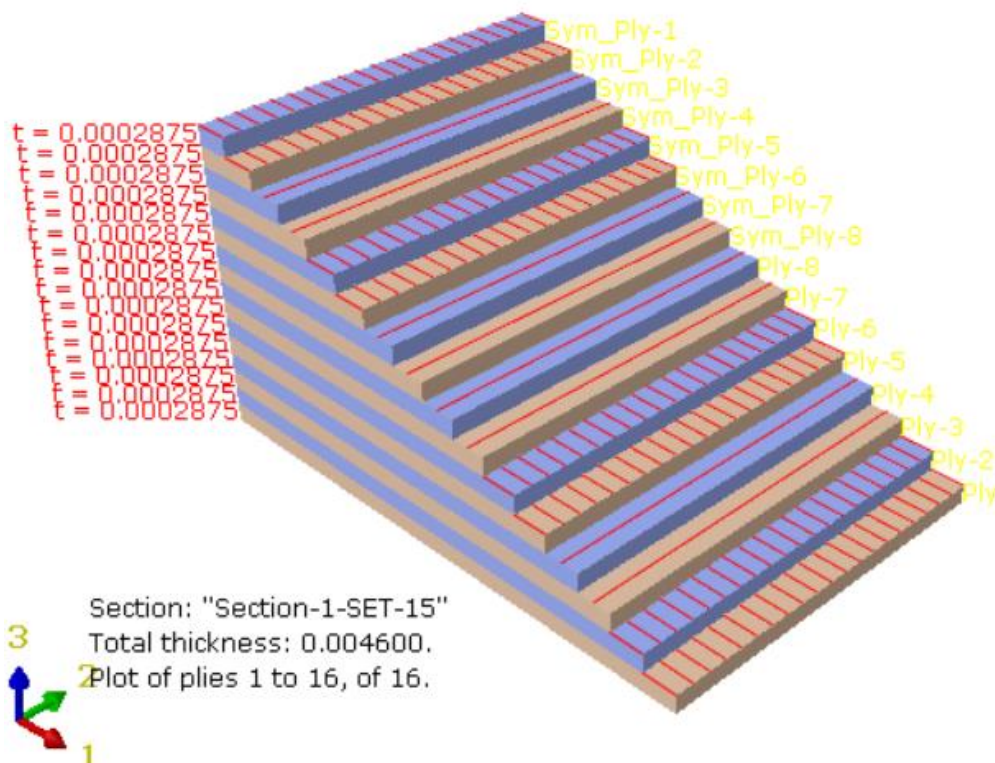
Basic **Advanced**

Thickness integration rule:  Simpson  Gauss

Symmetric layers

Material	Thickness	Orientation Angle	Integration Points	Ply Name
CF/EPOXY	0.0002875	0	1	Ply-1
CF/EPOXY	0.0002875	0	1	Ply-2
CF/EPOXY	0.0002875	90	1	Ply-3
CF/EPOXY	0.0002875	90	1	Ply-4
CF/EPOXY	0.0002875	0	1	Ply-5
CF/EPOXY	0.0002875	0	1	Ply-6
CF/EPOXY	0.0002875	90	1	Ply-7
CF/EPOXY	0.0002875	90	1	Ply-8

Slika 16. *Shell section* kompozitne ploče



Slika 17. *Ply stack plot* kompozitne ploče

Materijalu je trebalo još dodijeliti svojstva po kojima će se definirati propagacija oštećenja. To je napravljeno pomoću opcije *Damage for Fiber-reinforced Composites*, a izabran je kriterij

*Hashin Damage*. U tablici 2. prikazane su vrijednosti pojedinih veličina kojima je definirano oštećenje.

**Tablica 2. Svojstva za definiciju oštećenja materijala, [16]**

Svojstvo	Vrijednost
$F_{1t}$	1156 MPa
$F_{1c}$	578 MPa
$F_{2t}$	28 MPa
$F_{2c}$	154 MPa
$F_4$	37 MPa
$F_6$	32 MPa
$E_{L,t}$	86000 J/m <sup>2</sup>
$E_{L,c}$	104000 J/m <sup>2</sup>
$E_{T,t}$	1000 J/m <sup>2</sup>
$E_{T,c}$	1000 J/m <sup>2</sup>

gdje su:

$E_{L,t}$  – uzdužna energija loma pri vlačnom popuštanju vlakana,

$E_{L,c}$  – uzdužna energija loma pri tlačnom popuštanju vlakana,

$E_{T,t}$  – poprečna energija loma pri vlačnom popuštanju matrice,

$E_{T,c}$  – poprečna energija loma pri tlačnom popuštanju matrice.

Udarnim tijelima modeliran je samo vrh, s obzirom da samo površina koja je u kontaktu ima utjecaj na opterećenje laminata. Na to navodi i činjenica da u znanstvenom radu [15] ostale dimenzije udarnog tijela nisu navedene. Udarno tijelo definirano je kao kruto tijelo te mu je samo dodana masa i točka u kojoj se ona nalazi. U težište je dodana i *Reference Point* (vidljivo na slici 15.), u koju su pomoću opcije *Constraint-Rigid Body* povezane sve točke tog krutog tijela. To je napravljeno kako bi se moglo upravljati svim točkama toga tijela djelujući samo na jednu točku. Udarne tijela također su modelirana ljuskastim elementima.

Iz slike 18. vidljivo je da se udarna tijela nalaze na ploči, a ne na nekoj visini s koje će biti slobodno ispuštena. To je zato što nije modeliran slobodni pad, već djelovanje udarnog tijela brzinom u trenutku u kojem je već došlo do kontakta. Ta brzina  $v$  odgovara po iznosu brzini

koju bi tijelo mase  $m$  postiglo slobodnim padom u trenutku dodira s pločom, te se izračunava iz formulacije za kinetičku energiju  $E_k$ :

$$E_k = \frac{mv^2}{2}. \quad (2.35)$$

U tom slučaju brzina udara za udarna tijela iznosi:

$$v_{10,hem} = \sqrt{\frac{2E_k}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 10}{5,265}} = 1,949 \text{ m/s}, \quad (2.36)$$

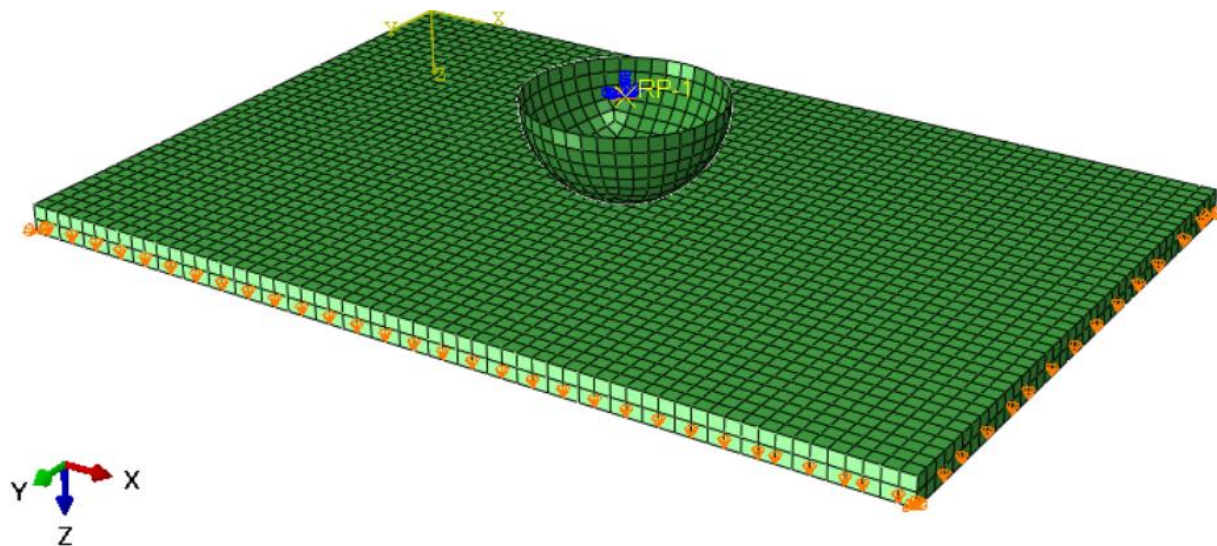
$$v_{30,hem} = \sqrt{\frac{2E_k}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 30}{5,265}} = 3,376 \text{ m/s}, \quad (2.37)$$

$$v_{10,rav} = \sqrt{\frac{2E_k}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 10}{5,255}} = 1,951 \text{ m/s}, \quad (2.38)$$

$$v_{30,rav} = \sqrt{\frac{2E_k}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 30}{5,255}} = 3,379 \text{ m/s}. \quad (2.39)$$

Brzina udara dodana je kao *Initial velocity in Predefined field*, što predstavlja početnu brzinu u nultom vremenu simulacije. Brzina je dodana u *RP* točku udarnog tijela, s obzirom da ona predstavlja gibanje svih materijalnih točaka toga tijela, kao što je ranije rečeno.

Na rubove ploče je zadano uklještenje, kako je definirano u eksperimentu, te je omogućen pomak udarnom tijelu samo u smjeru djelovanja brzine. Ograničenja su prikazana slici 18.

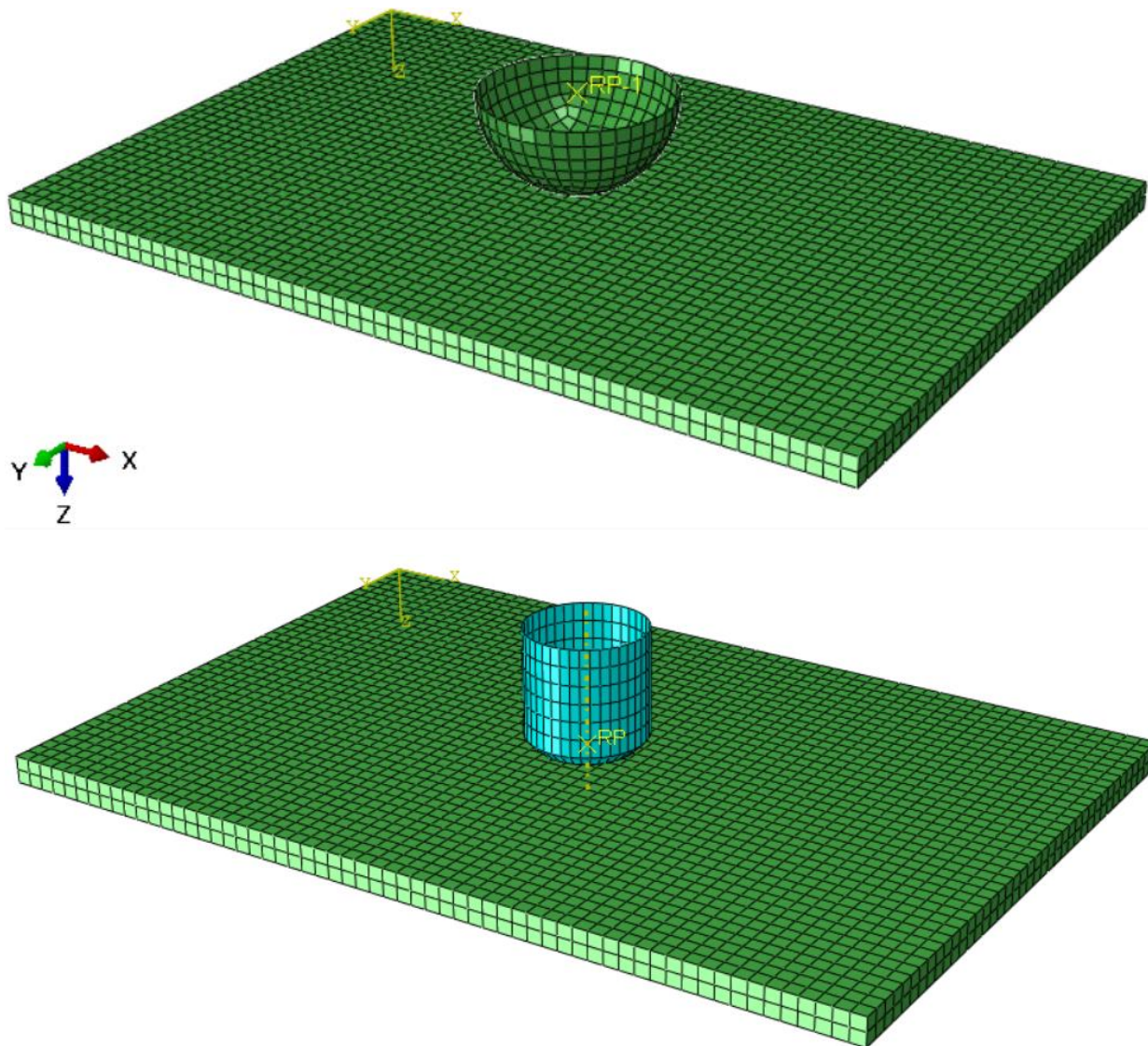


**Slika 18. Rubni uvjeti testnog postava**

Kako bi numerički model bio fizikalan, bilo je potrebno definirati i kontakt između udarnog tijela i ploče. Definiran je *Hard contact* u smjeru normale, dok je u tangencijalnom smjeru stavljena opcija *Frictionless*. Udarno tijelo i ploča stavljeni su u kontaktnu opciju *General contact*, prilikom čega softver računa da se kontakt događa između svake površine koja je u dodiru, makar bile i površine istog tijela.



Na slici 19. prikazana je generirana mreža na tijelima. Za ploču korišteni su *SC8R shell* elementi, a za udarna tijela *R3D4 shell* elementi. Mreža prikazana na slici, s 4800 elemenata na ploči, 302 elementa za kruto hemisferično tijelo i 391 elementom za kruto tijelo ravne površine udara, odabrana je nakon konvergencije rješenja.



Slika 19. Mreža hemisferičnog udarnog tijela (gore), ravnog udarnog tijela (dolje) i ploče

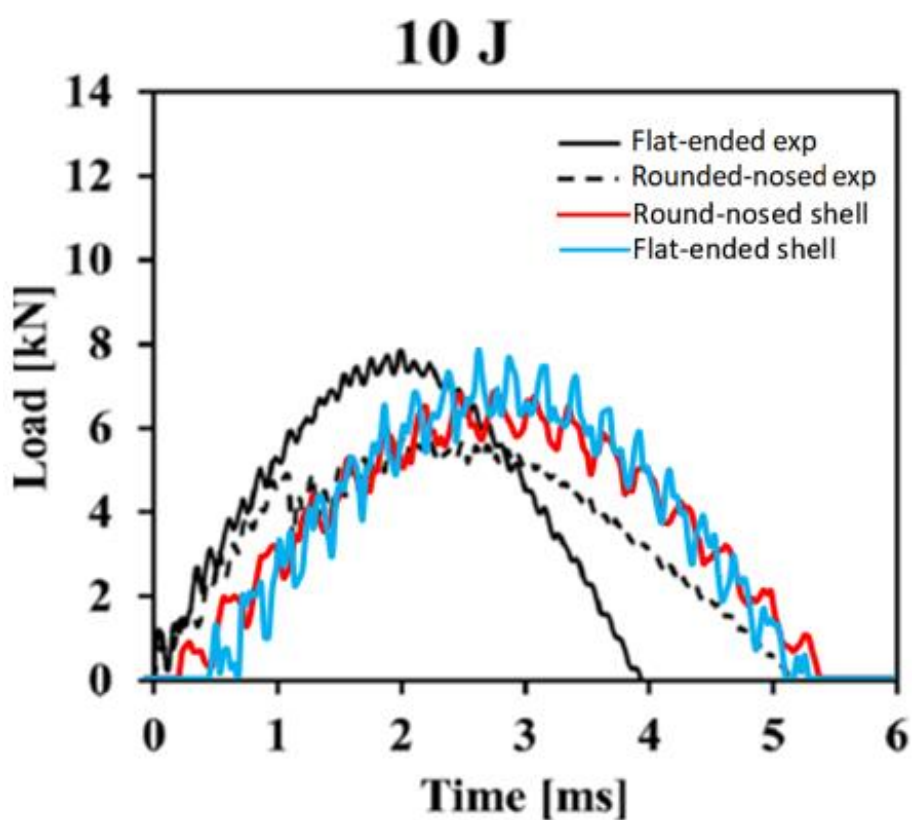
### 2.2.2.1. Rezultati i zaključak

Simulacija hemisferičnog udarnog tijela provodila se, prema rezultatima eksperimenta iz [15], za vrijeme od 6 ms kroz 35613 inkremenata za udarnu energiju od 10 J, i 28000 inkremenata za udarnu energiju od 30 J, a rezultati su zapisani u 200 inkremenata. Simulacija udarnog tijela ravne geometrije provodila se za vrijeme od 6 ms kroz 24637 inkremenata za udarnu energiju od 10 J, i vrijeme od 7 ms kroz 24061 inkremenata za udarnu energiju od 30 J, a rezultati su

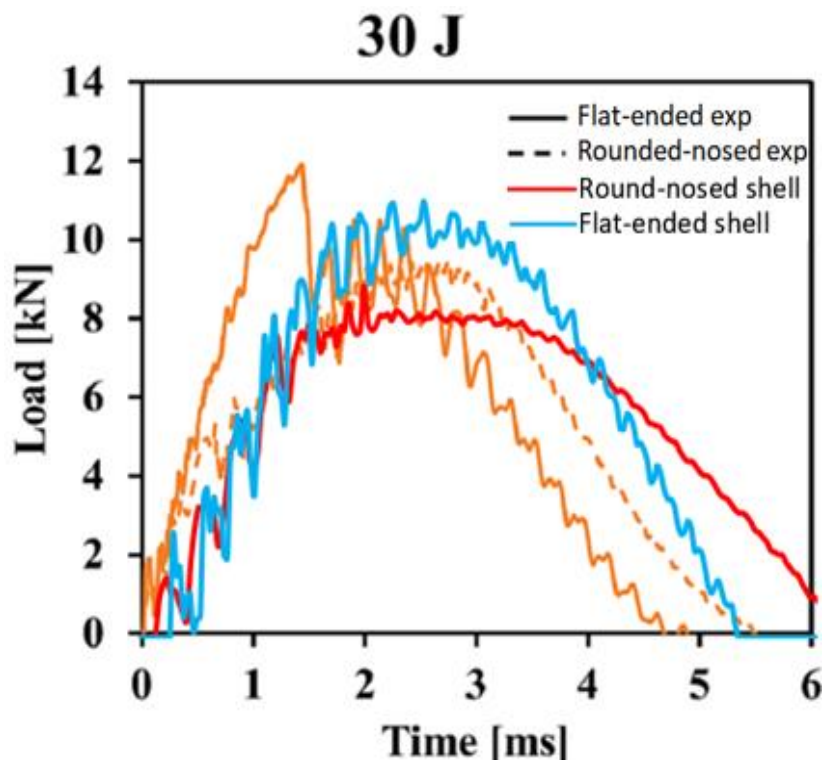
također zapisani u 200 inkremenata. Takav postav dao je zadovoljavajuću gustoću izlaznih podataka.

Izlazne varijable potrebne za usporedbu s eksperimentom su maksimalni pomak ploče, udarno opterećenje, apsorpciju energije i kriteriji oštećivanja.

Na slikama 20. i 21. prikazani su dijagrami ovisnosti kontaktne sila o vremenu, za obje veličine energije udara koje su se razmatrale, za obje vrste geometrije udarnog tijela. U eksperimentalnom postavu sva mjerenja počinju u trenutku kontakta. Prikazano je vrijeme jednog intervala u kojem je udarno tijelo udarilo u kompozitnu ploču, te nakon postizanja maksimalnog udarnog opterećenja, započelo s odbijanjem od iste.



Slika 20. Dijagram ovisnosti kontaktne sila o vremenu za energiju udara 10 J

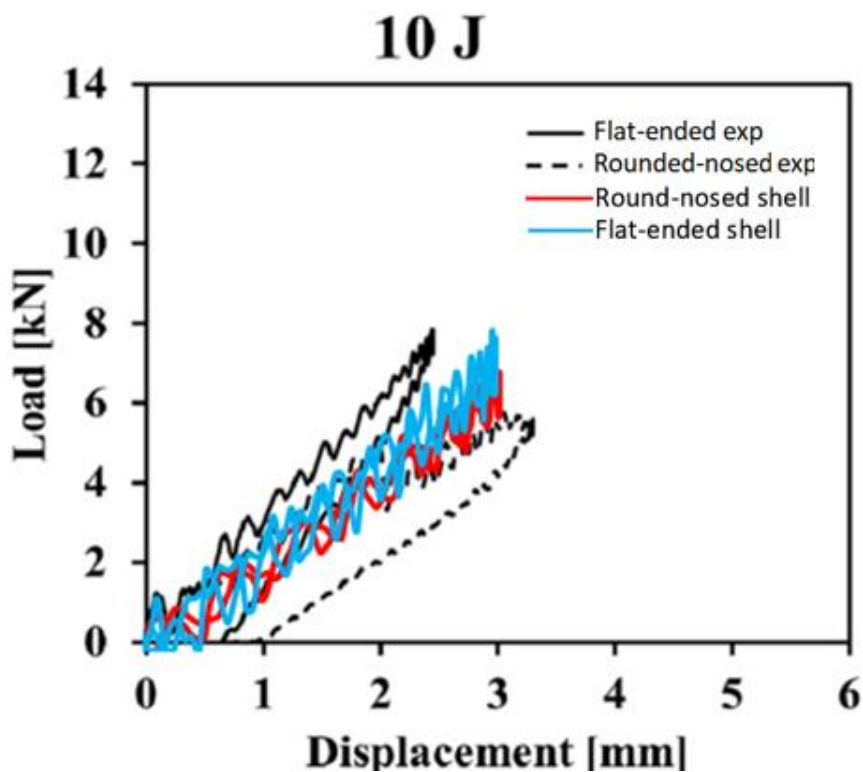


**Slika 21. Dijagram ovisnosti kontaktne sile o vremenu za energiju udara 30 J**

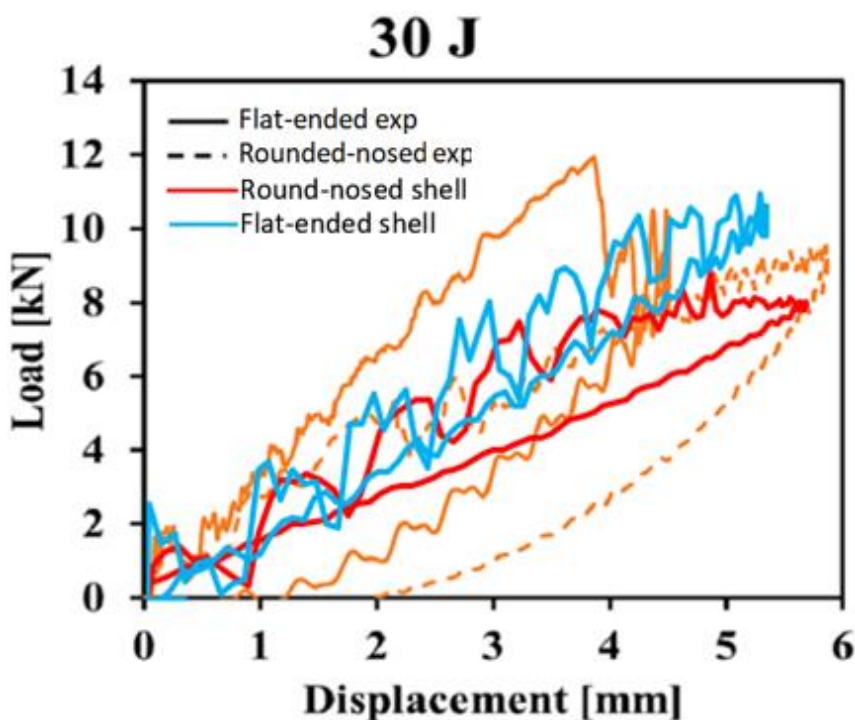
Iz slike 20. vidljivo je da se krivulja numeričke simulacije za udarnu energiju 10 J ne poklapa u potpunosti s eksperimentalnom krivuljom. Za hemisferično tijelo numerička postignuta maksimalna sila je nešto veća od eksperimentalne, dok za ravno udarno tijelo njena vršna vrijednosti korespondira s eksperimentalnim podacima. Za hemisferično tijelo vrijeme opterećivanja iznosi isto kao i u eksperimentu, dok je za ravno tijelo to vrijeme dulje u numeričkoj simulaciji. Završetak opterećenja u nuli na kraju ciklusa mjerenja znači da se udarno tijelo odbilo od deformabilne ploče, to jest izgubilo kontakt s njom, i ta pojava se pojavljuje i u numeričkim i eksperimentalnim rezultatima.

Iz slike 21. vidljivo je da se ni za energiju udara 30 J numerički i eksperimentalni rezultati u potpunosti ne poklapaju. Za hemisferično tijelo numerička maksimalna postignuta sila nešto je manja od eksperimentalne, i postignuta je u nešto većem vremenu u odnosu na eksperimentalne rezultate u [15]. Za ravno udarno tijelo vrijednost numeričke maksimalne udarne sile relativno odgovara eksperimentalnoj, ali se oblik krivulja ne podudara s eksperimentalnim vrijednostima. U eksperimentu udarno opterećenje postiže globalni maksimum nakon 1,5 ms, zatim malo pada i opet postiže lokalni maksimum, koji korespondira s numeričkim rezultatima. To je zbog pojave delaminacije u ploči koje softver ne može ispravno interpretirati. Na ovaj način dokazala se pretpostavka da razvoj oštećenja vlaknima ojačanih kompozita dovodi do degradacije vrijednosti elastičnog modula i Poissonovog koeficijenta, što ima za rezultat manje krajnje

vrijednosti opterećenja od maksimalnih postizivih. Numerički rezultati za udarno ravno tijelo gotovo korespondiraju s mjerenim vremenom u [15], a i kod hemisferičnog i ravnog tijela zabilježeno je odbijanje od deformabilne ploče nakon udara. Na slici 23. i 24. prikazana je ovisnost kontaktne sile o pomaku.



Slika 22. Dijagram ovisnosti kontaktne sile o pomaku za energiju udara 10 J



Slika 23. Dijagram ovisnosti kontaktne sile o pomaku za energiju udara 30 J



Kao što je vidljivo iz slika 22. i 23., ovisnost iznosa udarnog opterećenja o pomaku ne poklapa se u potpunosti s eksperimentalnim podacima.

Ako se promotre maksimalni pomaci, numerički izračunati maksimalni pomaci sredine ploče su u svim slučajevima manji od eksperimentalnih, osim kod ravnog udarnog tijela pri 10 J. Ta se razlika u pomacima može objasniti pojavom delaminacije u eksperimentu koja nije u potpunosti ispravno modelirana numerički. Zbog nje krutost ploče opada, što znači da će za istu silu pomaci biti veći. I eksperimentalni i numerički podaci pokazuju da je udarač s ravnim udarnim tijelom krući od hemisferičnog (što je tijelo kruće, postiže manje pomake).

Kada se zamisli da se u sustav unosi kinetička energija u obliku udarnog tijela koje pada na nepomičnu ploču, prilikom njihova kontakta dio kinetičke energije udarnog tijela pretvorit će se u unutarnju energiju deformiranja nepomične ploče. Potvrda te konstatacije je činjenica da udarnom tijelu prilikom udara pada brzina, to jest najveću brzinu ima u nultom trenutku simulacije. Fizikalnost opadanja brzine udarnom tijelu navodi na to da se izgubljeni dio kinetičke energije udarnog tijela pretvara u drugi oblik energije. Kinetička energije se s vremenom pretvara u energiju deformiranja ploče. Nakon udara brzina će se udarnog tijela i kinetička energija smanjivati, a apsorpcija energije ploče će se povećavati.

U tablici 3. prikazana je raspodjela energije deformabilne ploče za sve mjerene slučajeve, u trenutku najveće unutarnje energije ploče.

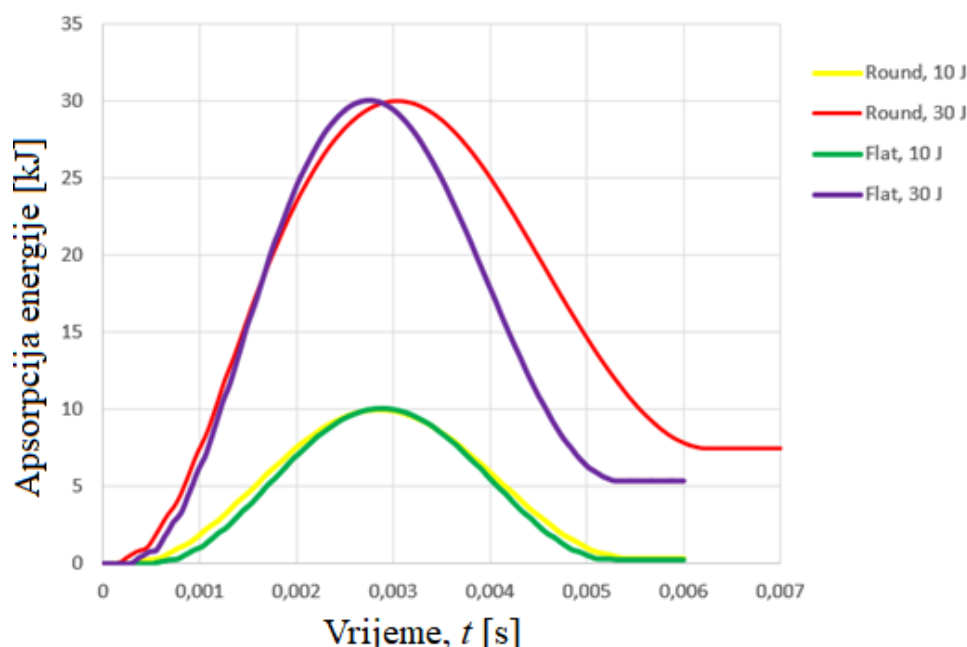
**Tablica 3. Raspodjela energije deformabilne ploče za sve mjerene slučajeve**

<b>Geometrija udarnog tijela</b>	<b>Energija udara</b>	<b>Vrijeme</b>	<b>Unutarnja energija</b>	<b>Energija elastičnog deformiranja</b>	<b>Disipirana energija oštećenja</b>
Hemisferično	10 J	2 ms	9,64 J	9,36 J	0,27 J
Ravno	10 J	3 ms	9,95 J	9,77 J	0,18 J
Hemisferično	30 J	2,9 ms	29,7 J	21,6 J	8,1 J
Ravno	10 J	2,8 ms	29,9 J	24,8 J	5,1 J

Iz tablice 3. vidljivo je da se inicijalna kinetička energija u većem dijelu pretvori u unutarnju energiju ploče, a mjerodavan trenutak za to je vrijeme najveće kontaktne sile, koje se također uglavnom poklapa s vremenom najveće apsorpcije energije ploče. Nadalje se unutarnja energija ploče raspodjeljuje na energiju elastičnog deformiranja i disipiranu energiju oštećenja. Iz

disipirane energije oštećenja zaključuje se da je oštećenje malo kod energije udara od 10 J. Što se tiče energije udara od 30 J, ovdje otprilike trećina energije odlazi na propagaciju oštećenja.

Na slici 24. prikazana je ovisnost apsorpcije energije ploče i vremena kontakta ploče i udarača za sve mjerene slučajeve.



**Slika 24. Ovisnost apsorpcije energije ploče i vremena kontakta za sve mjerene slučajeve**

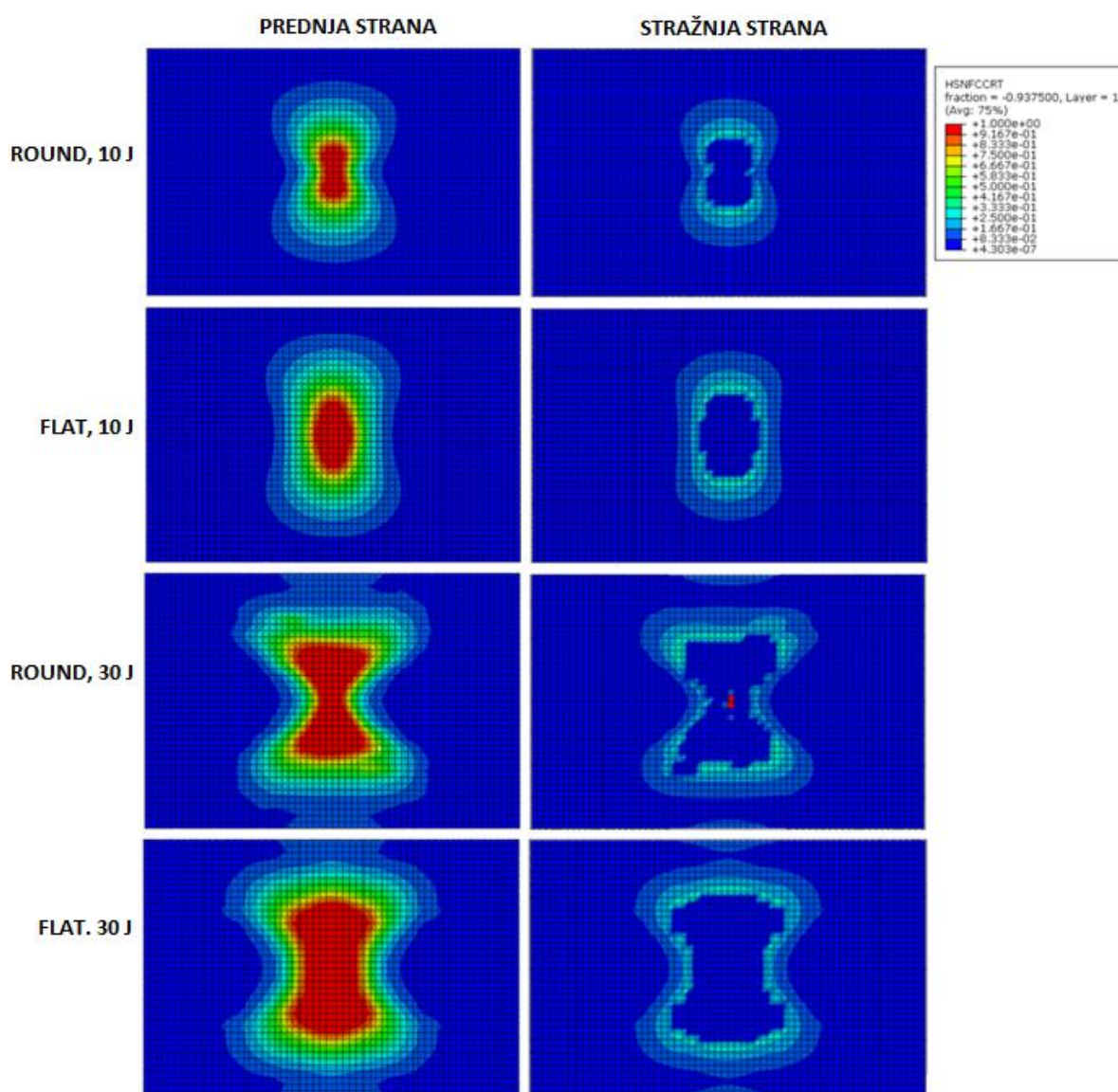
Na slici 24. se vidi da je u početnom trenutku ploča nedeformirana, odnosno apsorpcija energije joj je 0. S vremenom ova energija raste sve do iznosa početne kinetičke energije udarnog tijela – 10 i 30 J. Odnosno sva kinetička energija pretvorena je u energiju deformiranja i brzina udarnog tijela je jednaka nuli. To se događa u trenucima maksimalne kontaktne sile. Nakon tog trenutka tijelo se počinje kretati u suprotnom smjeru, odnosno njegova brzina i kinetička energija rastu, što znači da će energija apsorpcije padati. Pri tome se smatra da je sustav idealan, odnosno da nema gubitaka energije (npr. na toplinu ili trenje).

U slučaju hemisferičnog udarnog tijela, dodirna ploha između tijela i ploče je jedan čvor, odnosno naprezanja i deformacije ploče su vrlo koncentrirane. Kod ravnog udarnog tijela dodirna površina je konačna površina. To rezultira manjim maksimalnim pomakom i većom krutosti u slučaju ravnog udarnog tijela te sporijim pretvaranjem kinetičke energije udarnog tijela u energiju deformiranja ploče.

Na slikama 25. i 26. prikazana je raspodjela Hashinovog kriterija popuštanja za tlačni lom vlakana i matrice po površini ploče, za sve mjerene slučajeve, za prvi sloj laminata. Vlačni lom vlakana i matrice ne manifestira se u rezultatima te se stoga neće ni obraditi. Treba napomenuti

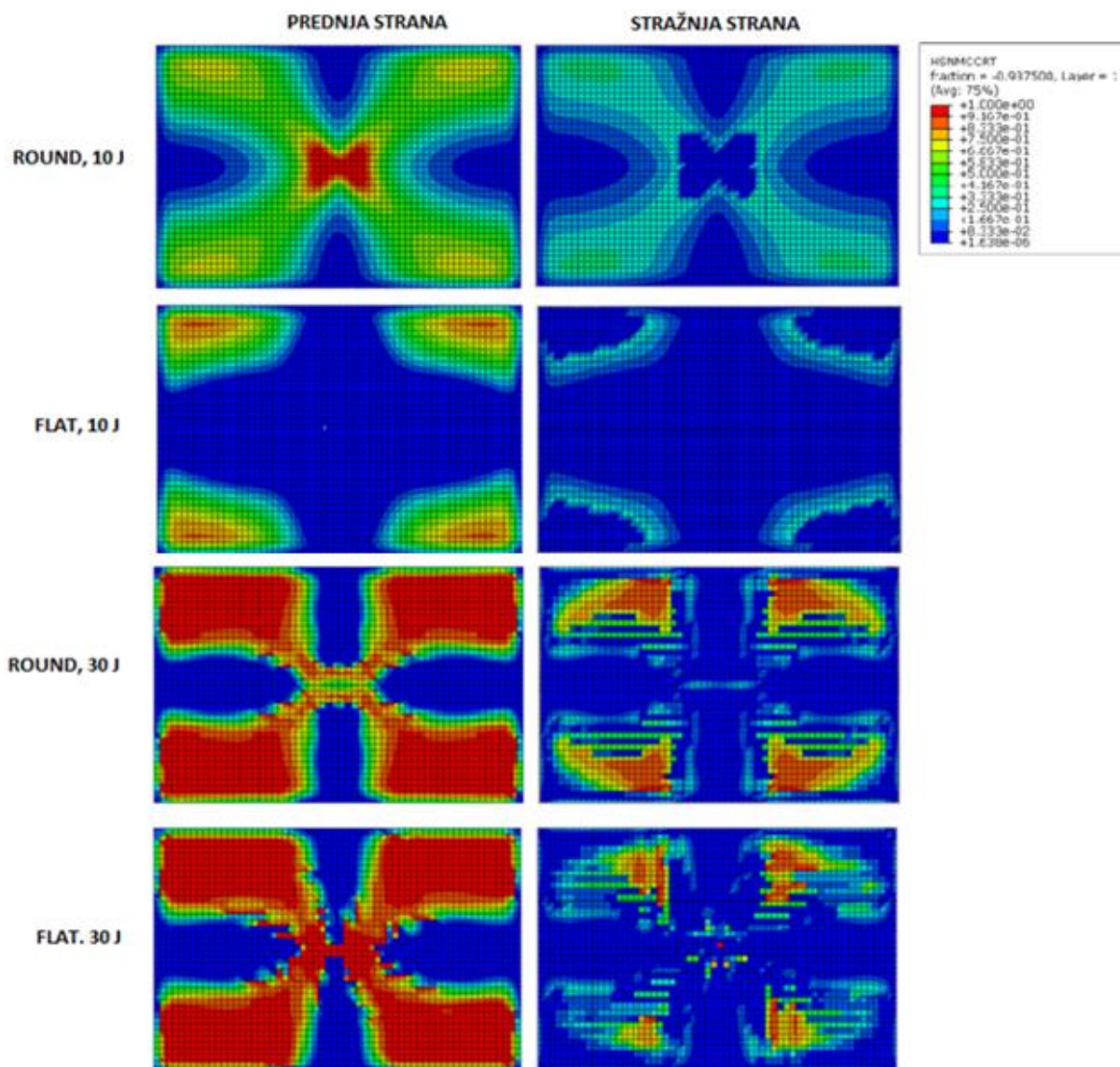
da je po Hashinu oštećenje nastupilo samo kada je vrijednost varijable 1, a sve vrijednosti ispod toga predstavljaju inicijaciju oštećenja.

U tablici 4. dan je podatak o udjelu konačnih elemenata za koje je konstatiran lom vlakana i matrice (zadovoljen Hashinov kriterij popuštanja) u odnosu na ukupnu površinu ploče. Također su dane vrijednosti parametara *Fiber Compressive Damage Variable* (DAMAGEFC) i *Matrix Compressive Damage Variable* (DAMAGEMC). Vrijednosti iz tablice 4. dobivene su prebrojavanjem elemenata ploče koji su u zadnjem koraku simulacije imali vrijednost pojedinačnog Hashinovog kriterija popuštanja 1. Dozvoljeno je orijentirati se samo po zadnjem koraku zbog činjenice ako element u nekom *frame*-u dostigne vrijednost Hashina 1, ta vrijednost je trajna do zadnjeg koraka simulacije.



Slika 25. Hashinov kriterij popuštanja za tlačni lom vlakana za ploču

Iz slike 25. vidljivo je da lom vlakana nastaje u središnjem dijelu ploče te se rasprostire okomito na smjer rasprostiranja vlakana za kut orijentacije  $0^\circ$  (vidljivo iz slike 11.). Za energiju udara od 10 J, udarno tijelo ravne geometrije uzrokuje veći lom vlakana u odnosu na hemisferično tijelo. Isti zaključak vrijedi i za energiju od 30 J.



**Slika 26. Hashinov kriterij popuštanja za tlačni lom matrice za ploču**

Iz slike 26. vidljivo je da lom matrice nastaje u središnjem dijelu ploče te se rasprostire uzduž smjera rasprostiranja vlakana za kut orijentacije  $0^\circ$  (vidljivo iz slike 11.). Pri energiji udara od 10 J tijelo hemisferične geometrije uzrokuje veći lom matrice u odnosu na tijelo ravne geometrije. Pri većim energijama udara oba tijela prouzrokuju podjednaku veličinu loma matrice.

**Tablica 4. Pojava oštećenja na površini ploče**

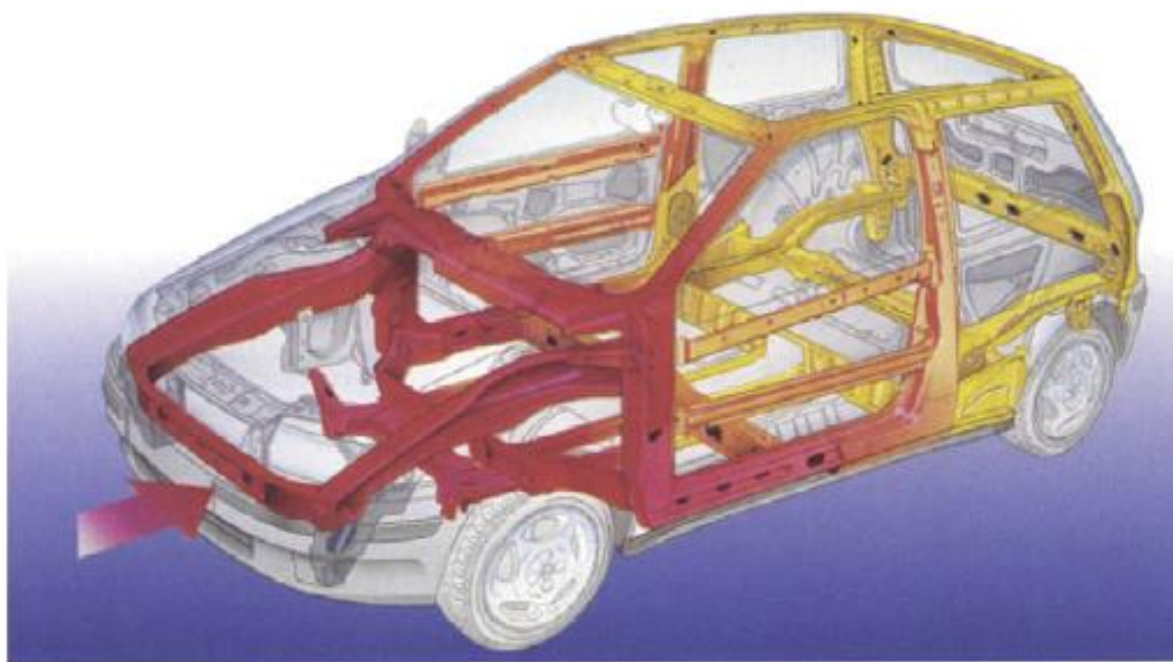
	<b>Udio loma vlakana</b>	<b>Udio loma matrice</b>	<b>DAMAGEFC</b>	<b>DAMAGEMC</b>
<b>Round, 10 J</b>	1,6 %	2,7 %	0,61	1,0
<b>Flat, 10 J</b>	3,5 %	0,8 %	0,2	0
<b>Round, 30 J</b>	9,3 %	87 %	0,97	1,0
<b>Flat, 30 J</b>	10,2 %	87 %	0,691	1,0

Usporedbom rezultata iz tablice 4. sa slikom 14. može se zaključiti da rezultati CT skena najbolje korespondiraju vrijednostima koje daju DAMAGEFC i DAMAGEMC varijable. To najbolje dokazuje činjenica da se kod ravnog udarnog tijela pri 10 J uopće ne manifestira oštećenje koje odgovara vrijednostima varijabli DAMAGEFC = 0,2 DAMAGEMC = 0. Stječe se pretpostavka da su DAMAGEFC i DAMAGEMC mjerodavne varijable za pretpostavku pojave oštećenja, dok su Hashin varijable za vlakna i matricu pogodne za predviđanje smjera širenja oštećenja, s obzirom da prilično dobro odgovaraju oblikom površine grafičkim prikazima dobivenima CT skenom.



### 3. ZAŠTITNA KONSTRUKCIJA VOZILA OPTEREĆENA UDARNIM OPTEREĆENJEM

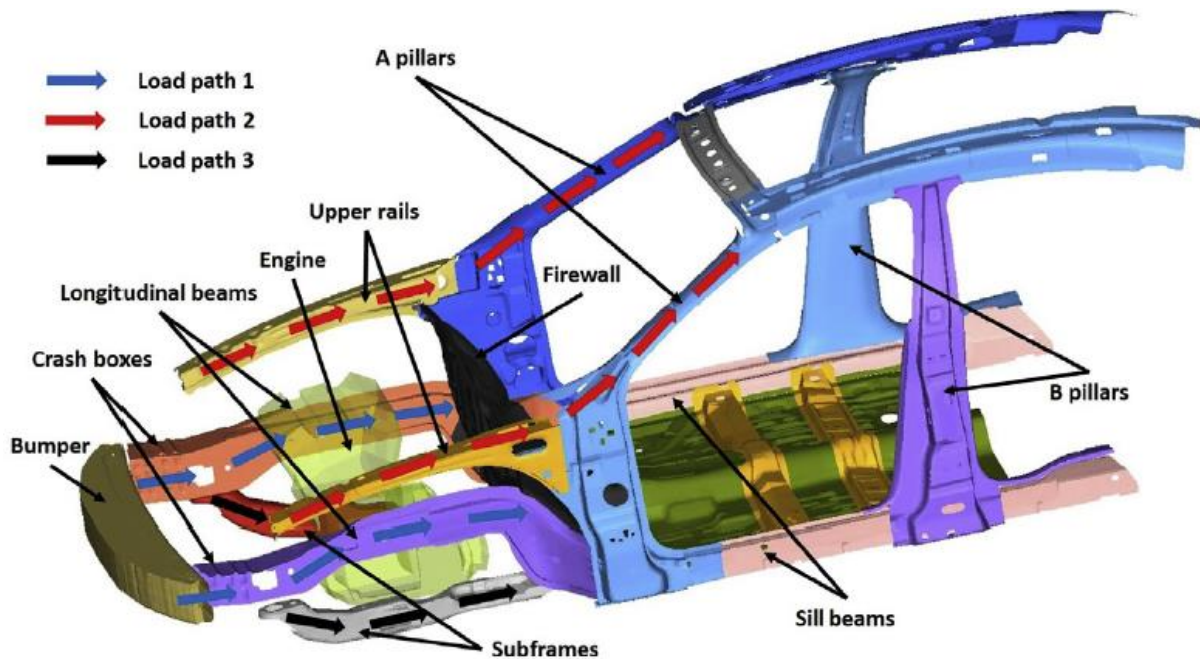
Karoserija vozila mora jamčiti adekvatnu savojnu i torzijsku krutost tijekom vožnje te otpornost na statičko i dinamičko opterećenje, a sve u svrhu garantirane sigurnosti putnika. U praksi se za karoseriju vozila koristi lijevani čelični lim međusobno povezan točkastim zavarivanjem u konstrukciju kao na slici 27. Crveno je naznačen dio vozila koji preuzima najveći dio udarnog opterećenja prilikom frontalnog sudara, eng. *Crash structure*, [17]. Takva konstrukcija mora biti dovoljno elastična kako bi apsorbirala energiju udara i spriječila daljnji prijenos energije na putničku kabinu.



**Slika 27. *Crash structure* konstrukcija [17]**

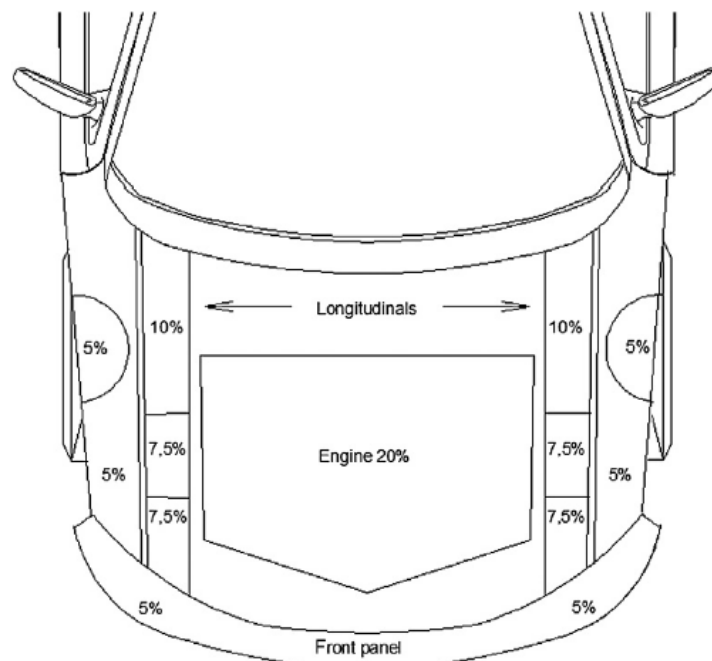
Prilikom frontalnog sudara nekoliko je trajektorija udara koje zahvaćaju prednju konstrukciju automobila, što se vidi na slici 28. Trajektorija udara 1 apsorbira više od 50 % energije udara za vrijeme sudara. Nju čine branik (eng. *Bumper*) i uzdužni nosači (eng. *Longitudinal Beams*). Branik je obično izrađen od čelika, aluminijske ili plastike, i prvi je element koji apsorbira energiju prilikom sudara. Što bolje branik apsorbira udarnu energiju, to će troškovi popravka pri svakodnevnim sudarima malih brzina biti manji. Uzdužni nosači na mjestu gdje se spajaju s branikom imaju takozvani eng. *Crash box*, to jest tankostijeni element koji svojom deformacijom za vrijeme sudara preuzima dio uzdužnog opterećenja s nosača. Nosači su također tankostijeni, ali ipak imaju veću čvrstoću od *Crash box*-a. Cilj je da zadrže svoj oblik,

ali njihova mogućnost da se saviju i deformiraju štiti putnički prostor od direktnog utjecaja energije udara. Ovaj dio vozila zove se *eng. Crumple Zone* (zona gužvanja).



**Slika 28. Trajektorije opterećenja pri frontalnom sudaru [17]**

No ne preuzima samo opisana konstrukcija udarno opterećenje, već i drugi dijelovi vozila smješteni u prednjem dijelu. Čak 20 % udarne energije preuzme sam motor, ali u ovom radu ta činjenica neće biti uzeta za razmatranje. Na slici 29. prikazana je shematski raspodjela apsorpcije energije između dijelova prednjeg dijela vozila prilikom frontalnog sudara.



**Slika 29. Shematska raspodjela apsorpcije energije prednjeg dijela vozila prilikom frontalnog sudara [17]**

Izazov je konstruirati vozilo koje će u isto vrijeme biti elastično i imati dovoljno veliku apsorpcijsku zonu u svom prednjem dijelu, a s druge strane zadovoljiti kriterije čvrstoće i krutosti u svrhu očuvanja sigurnosti putnika.

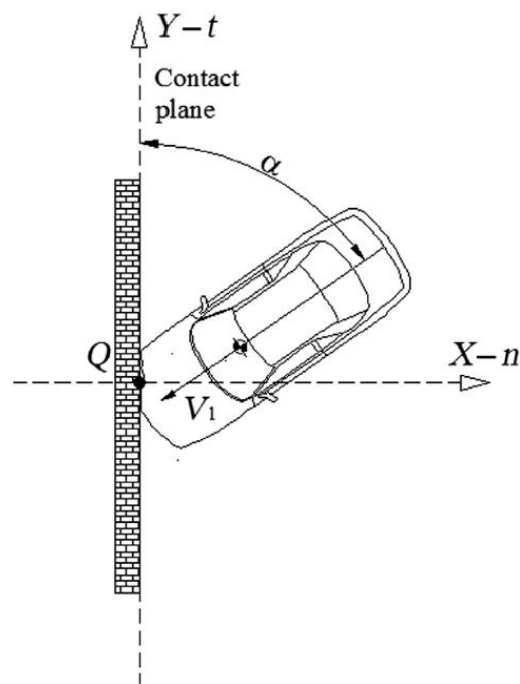
Na slici 30. prikazan je frontalni sudar u kojem je prednja konstrukcija vidljivo preuzela udarno opterećenje te time zaštitila ostatak vozila od oštećenja.



Slika 30. Frontalni sudar i oštećenje prednjeg dijela vozila [18]

### 3.1. Teorijske osnove frontalnog sudara vozila i krute barijere

U svrhu izrade ovog diplomskog rada biti će razmatran frontalni sudar vozila s čvrstom barijerom, s uvjetom da je vozilo kroz cijeli period trajanja sudara okomito na prepreku. Shema sudara s barijerom prikazana je na slici 31.



Slika 31. Frontalni sudar vozila s čvrstom barijerom [17]



U ovakvom modelu pretpostavlja se da je barijera kruta i nepomična, što znači da ne ubrzava, ne preuzima dio kinetičke energije vozila koje na nju nailazi, te njena masa i inercija nisu uzete u obzir. Komponente brzine koju vozilo razvija glase, [17]:

$$\bar{v}_{1x} = \frac{m_1 y_1^2 - \mu^2 m_1 x_1 y_1 - \beta J_1}{m_1 y_1^2 - \mu^2 m_1 x_1 y_1 + J_1} v_{1x}, \quad (3.1)$$

$$\bar{v}_{1y} = V_{1y} - \frac{J_1 \mu (1 + \beta)}{m_1 y_1^2 - \mu^2 m_1 x_1 y_1 + J_1} v_{1x}, \quad (3.2)$$

gdje su:

$v_{1x}$  – komponenta brzine vozila u smjeru  $x$  osi prije sudara,

$v_{1y}$  – komponenta brzine vozila u smjeru  $y$  osi prije sudara,

$\bar{v}_{1x}$  – komponenta brzine vozila u smjeru  $x$  osi nakon sudara,

$\bar{v}_{1y}$  – komponenta brzine vozila u smjeru  $y$  osi nakon sudara,

$m_1$  – masa vozila,

$x_1$  – koordinata trenutnog položaja u smjeru  $x$  osi,

$y_1$  – koordinata trenutnog položaja u smjeru  $y$  osi,

$\mu$  – trenje između vozila i krute barijere,

$\beta$  – koeficijent restitucije;

$J_1$  – moment inercije vozila oko vertikalne osi.

Izraz za kutnu brzinu koju vozilo razvija glasi:

$$\bar{\omega}_1 = \frac{m_1 (1 + \varepsilon_i) (\mu x_1 - y_1)}{m_1 y_1^2 - \mu^2 m_1 x_1 y_1 + J_1} v_{1x}. \quad (3.3)$$

Kinetička energija kojom vozilo nailazi na krutu barijeru glasi:

$$E = \frac{1}{2} m_1 (v_{1x}^2 + v_{1y}^2) + \frac{1}{2} J_1 \omega_1^2. \quad (3.4)$$

Tipični sudar može se promatrati u dvije faze; kompresijska i restitucijska.

Kompresijsku fazu karakterizira trenutak u kojem vozilo i kruta barijera dođu u kontakt za vrijeme kojeg vozilo ima početnu brzinu. U ovom dijelu sudara dio kinetičke energije vozila apsorbira dio konstrukcije vozila koji se deformira. Ova apsorbirana energija ima dvije komponente; elastičnu i neelastičnu. Elastična komponenta se pretvara u drugu energiju u restitucijskoj fazi, to jest prelazi s tijela koje ju je prvotno apsorbiralo nazad u sustav. Neelastična komponenta povezana je s trajnom deformacijom konstrukcije, te se stoga smatra nepovrativom u sustav, za razliku od elastične, [17].

Restitucijska faza povezana je s oslobađanjem energije apsorpcije iz dijela konstrukcije vozila koji je sudjelovao u sudaru, i njenog pretvaranja nazad u kinetičku energiju. Količina tog oslobađanja energije ovisi o geometriji, materijalu i izvedbi konstrukcije. Pretvorba apsorbirane energije udara nazad u kinetičku označava odbijanje vozila od krute barijere, [17].

### 3.2. *Crash test*

Eng. *Crash test* je kontrolirani eksperiment u kojem je vozilo podvrgnuto frontalnom sudaru, u svrhu analiza njegovog ponašanja i performansi za vrijeme sudara i malo nakon njega, te utjecaja udarnog opterećenja na samo vozilo i potencijalne putnike u njemu. *Crash test* izvodi se u svrhu kontrole kvalitete i sigurnosti vozila te validacije njegove konstrukcije. Cilj je konstruirati vozilo na način da njegovi putnici maksimalno budu pošteđeni učinaka udarnog opterećenja ukoliko dođe do njega, [17].

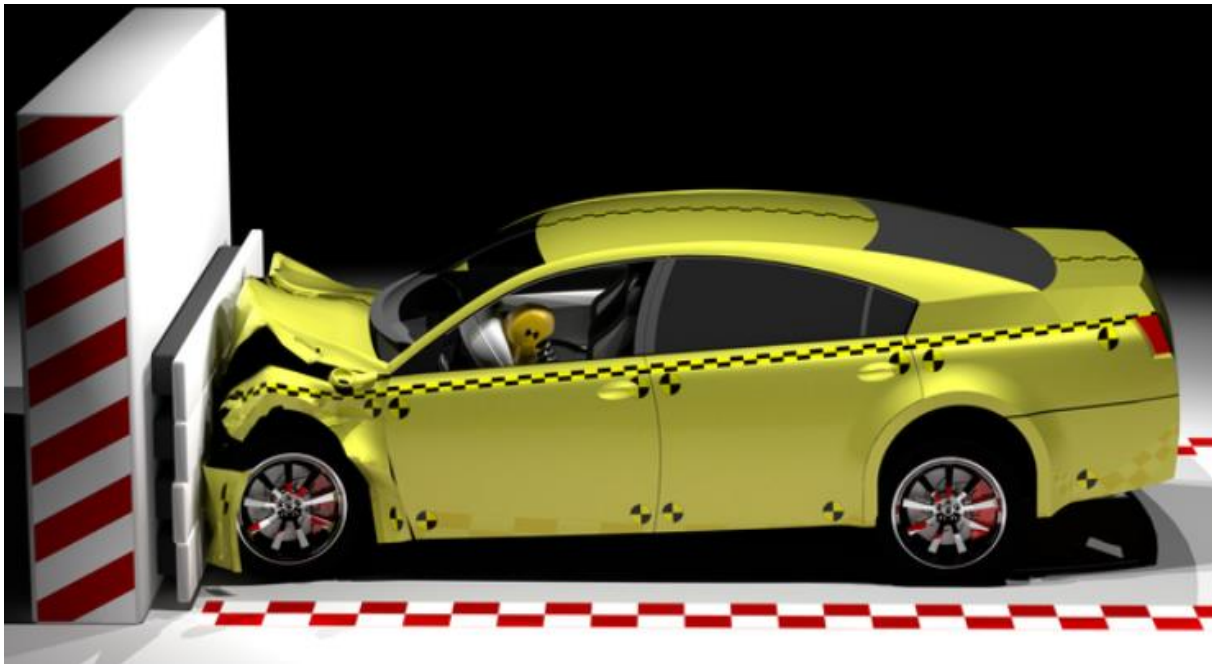
Organizacija koja utvrđuje protokol po kojem se izvode udarna ispitivanja vozila u Europskoj uniji zove se *The European New Car Assessment Programme* (Euro NCAP). Zbog složenosti ispitivanja i cijene, za ovakvu vrstu ispitivanja odabiru se vozila nove i specifične konstrukcije, [19].

Nadalje će biti pojašnjen testni protokol frontalnog sudara vozila u betonski zid, u kojem je cilj procjena oštećenja vozila, a ne i šteta nanesena putnicima. Razlika je u korištenju lutaka (*eng. Dummies*) kod kojih se elektronički prate sile, momenti, vibracije itd., kojima ljudsko tijelo bude izloženo tijekom sudara.

Vozilo se ispituje sa svim dodatnim uobičajenim masama koje ga opterećuju – do kraja napunjen rezervoar za gorivo, maksimalno napumpane gume, rezervna guma u prtljažniku, do kraja nadopunjeni spremnici za ulje itd. Također se uzimaju u obzir i putnici te se na vozačevo i suvozačevo mjesto stavljaju mase od 80 kg koje njih reprezentiraju, zajedno s prtljagom mase 50 kg u prtljažniku. Moguće je nadodati i masu koja predstavlja djecu u stražnji putnički prostor (23 i 36 kg), [19].

Trenutni testni protokol uključuje brzinu vozila od  $50 \pm 1$  km/h, pod kutom naleta  $0 \pm 2^\circ$ . Vozilo može biti testirano tako da nailazi na betonski zid, ili cijelim tijelom, ili dijelom svog tijela (npr. desni dio branika). Nakon testa protokol obuhvaća provjeru otvaranja svih vrata, ili ručno ili alatom, s obzirom da je bitno da putnici iz deformiranog vozila mogu izaći. Zatim ide procjena štete te analiza rezultata dobivenih elektroničkim mjerenjem; udio energije apsorpcije, deformacija vozila, zaostale brzine nakon udara, pomaka u odnosu na prvotnu trajektoriju gibanja itd., [19]

Na slici 32. prikazan je testni postav *Crash test-a*.



Slika 32. Testni postav *Crash test-a* [20]

## 4. NUMERIČKO MODELIRANJE ZAŠTITNE KONSTRUKCIJE VOZILA OPTEREĆENE UDARNIM OPTEREĆENJEM

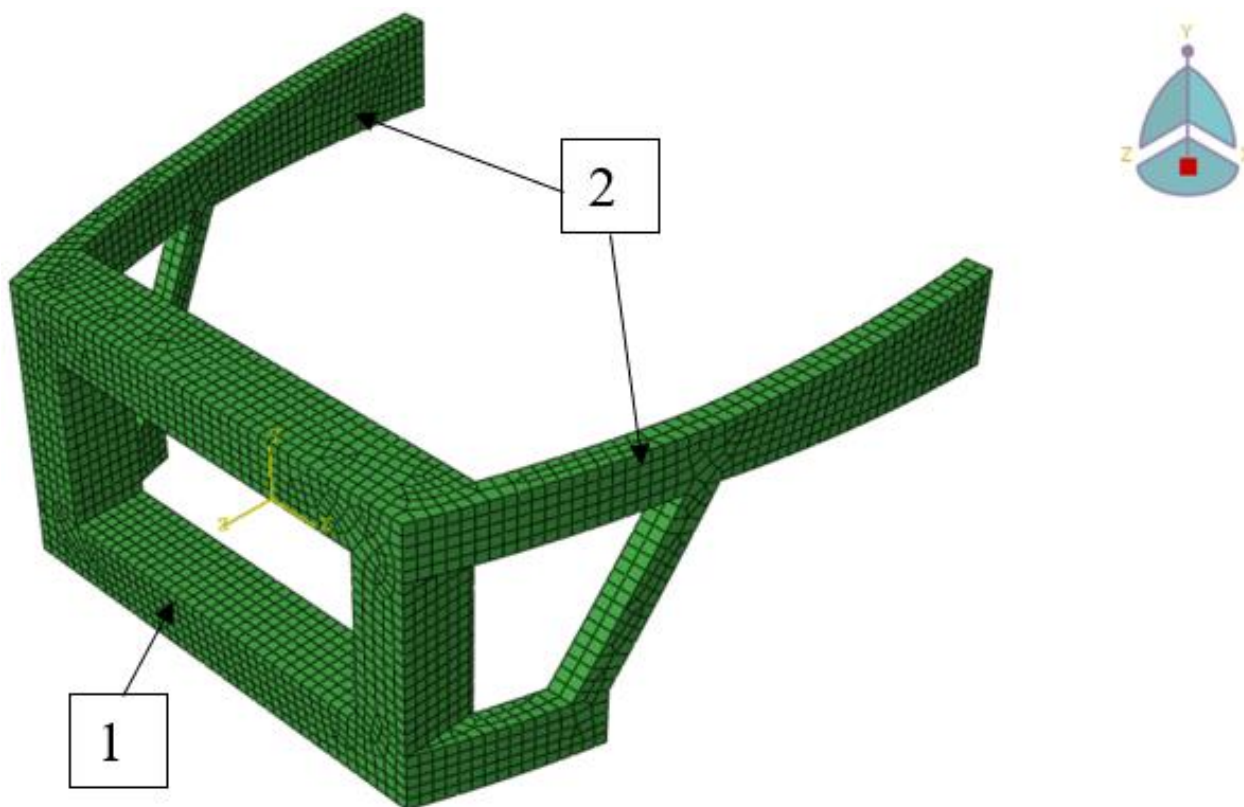
U sklopu ovog diplomskog rada bilo je potrebno napraviti numerički proračun pojednostavljene kompozitne konstrukcije koja služi za apsorpciju energije udara.

### 4.1. Numerički model

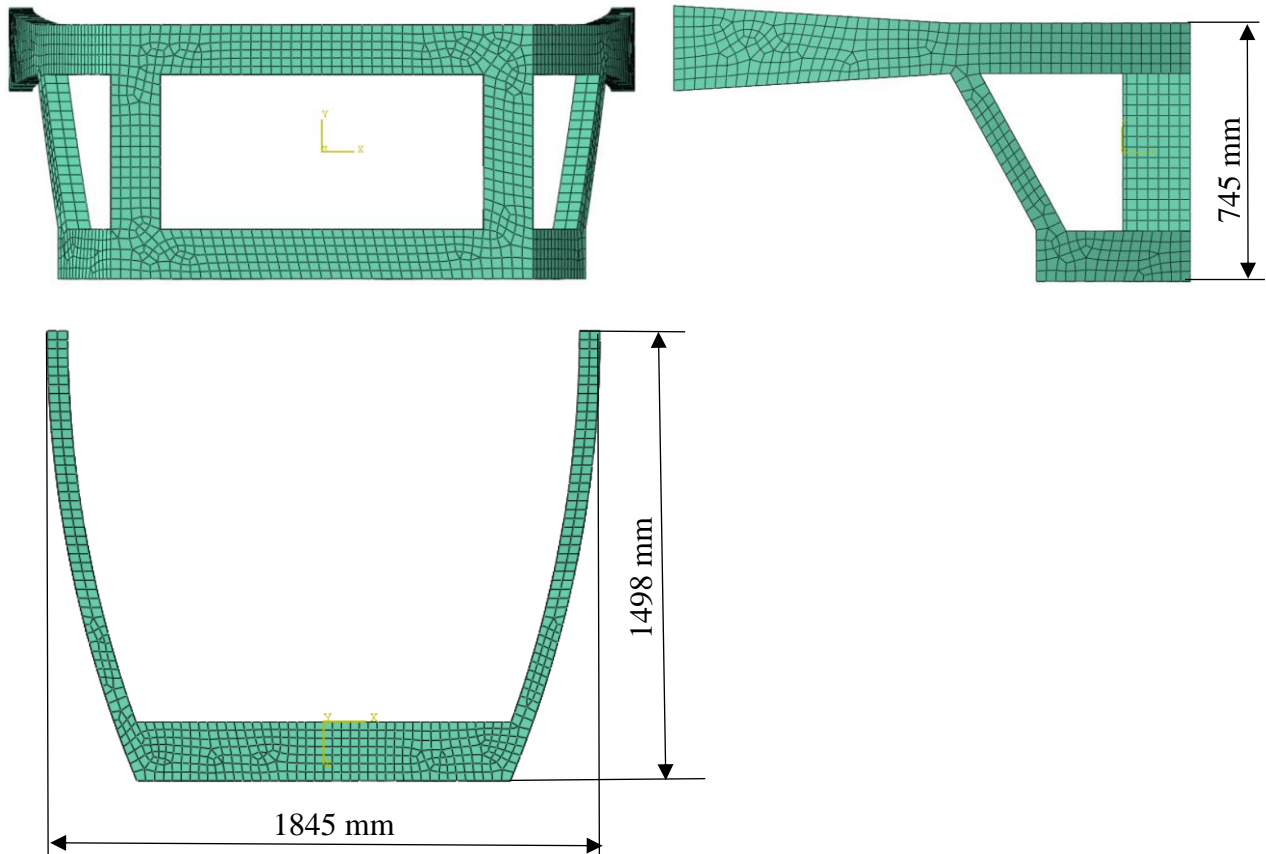
#### 4.1.1. Opis sklopa i materijalni model

Osnova numeričkog modela je tankostijena konstrukcija prednje strane vozila, čije su geometrija, dimenzije i elementi prikazani na slikama 33. i 34. Ona je napravljena po uzoru na sliku 28., kao element karoserije koji preuzima najveći udio kinetičke energije pri udaru. Modelirana zaštitna konstrukcija sastoji se od branika (1) i uzdužnih nosača (2). Zbog pojednostavljenja, uzdužni nosači u ovom slučaju preuzimaju funkciju i elementa *Crash box*.

Zamišljeno je da je konstrukcija proizvedena metodom izrade u mokrom kalupu u dva dijela te spojena lijepljenjem ili spojnim elementima.

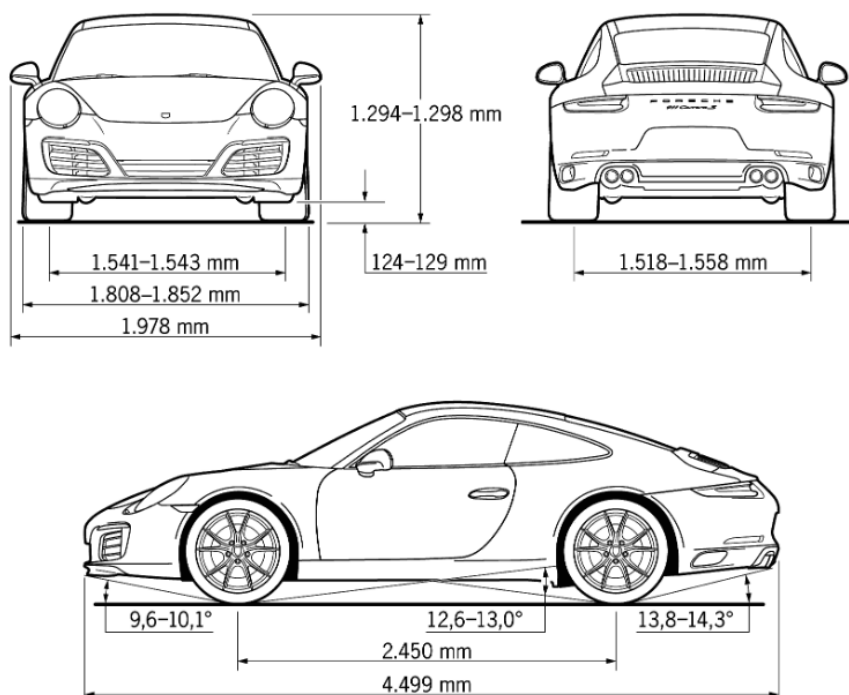


Slika 33. Modelirana zaštitna konstrukcija; 1 – branik, 2 – uzdužni nosači



**Slika 34. Dimenzije modelirane zaštitne konstrukcije (pogled u perspektivi)**

Zamišljeno je da dimenzije odgovaraju dimenzijama uobičajenog sportskog automobila. Gabaritne dimenzije modela su 1845 x 1498 x 745 mm, i modelirane su po uzoru na vozilo *Porsche Carrera 911*, prikazano na slici 35.



**Slika 35. Porsche Carrera 911 [21]**

Za numeričku analizu uzeto je pet konfiguracija, od kojih su četiri konfiguracije kompozita sa svojstvima iz tablice 1. i 2., s različitom orijentacijom slojeva te legura aluminija, s obzirom da se ona učestalo koristi za dijelove vozila sportskih automobila. Rasporedi slojeva kompozita dani su u tablici 5., a materijalna svojstva aluminija u tablicama 6. i 7.

**Tablica 5. Rasporedi slojeva kompozita korištene u simulaciji**

Prva konfiguracija	$[0_2/90_2]_{2s}$
Druga konfiguracija	$[0/45/-45/90]_{2s}$
Treća konfiguracija	$[0/45/-45/0]_{2s}$
Četvrta konfiguracija	$[0_4/90_3/0]_s$

**Tablica 6. Materijalna svojstva aluminijske legure, [21]**

Svojstvo	Vrijednost
$E$	71,016 GPa
$\nu$	0,3
$\rho$	2823 kg/m <sup>3</sup>

**Tablica 7. Definiranje ponašanja aluminijske legure u plastičnom području, [21]**

Naprezanje, $\sigma$	Plastična deformacija, $\epsilon$
263 MPa	0
322 MPa	0,011
378 MPa	0,025
445 MPa	0,066
496 MPa	0,111
544 MPa	0,171

Globalni koordinatni sustav definiran je kao na slici 33., a lokalni koordinatni sustav s osi  $z$  okomitom na svaku plohu. To je smjer rasprostiranja debljine stijenke. Smjer u kojem se rasprostiru vlakna pri kutu zakreta  $0^\circ$  je uzduž  $x$  osi u globalnom koordinatnom sustavu za branik, i uzduž  $z$  osi za nosače.

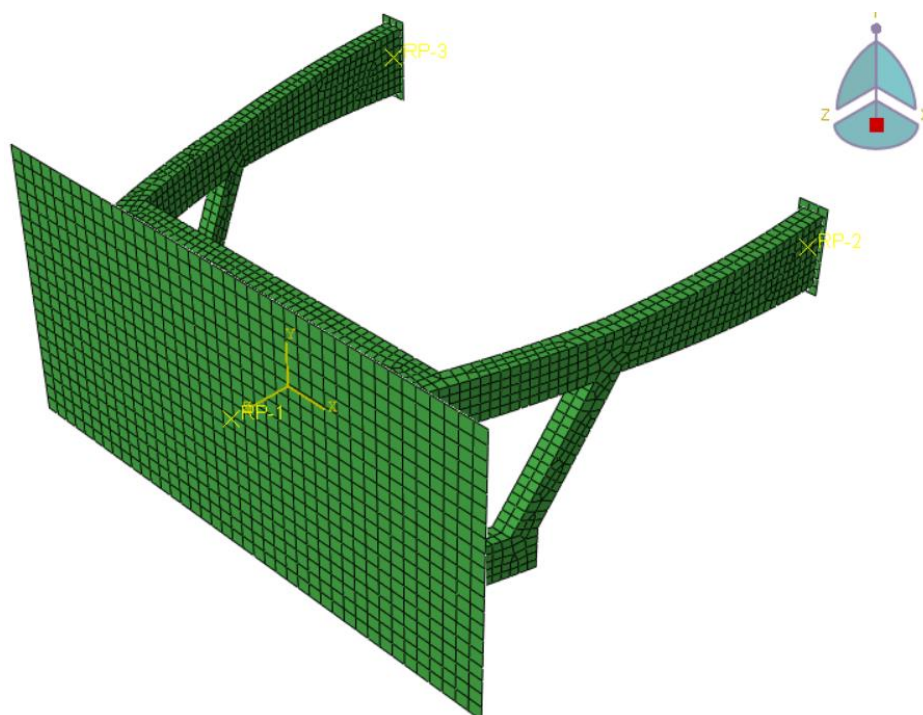
Vrijednosti u tablici 7. služe za definiranje ponašanja u plastičnom području u modelu izotropnog očvršćenja.

Konstrukcija nema uniformnu debljinu stijenke, s obzirom da je iteracija različitih rasporeda slojeva pokazala da se konstrukcija najfizikalnije ponaša podvrgnuta udarnom opterećenju, ako uzdužni nosači imaju nešto veću debljinu od prednjeg dijela konstrukcije. Za kompozit debljina branika iznosi 3 mm, dok je debljina nosača 4,6 mm. Za izvedbu konstrukcije od legure aluminija debljina lima branika iznosi 1,5 mm, a nosača 2,9 mm.

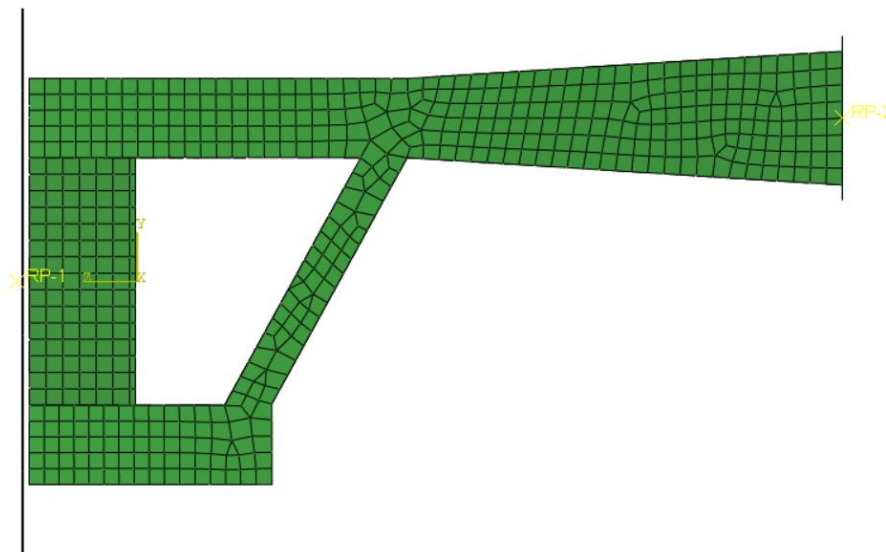
Polazište za dobivanje numeričke vrijednosti lima kompozita bio je validacijski eksperiment, tako da je za deblji dio konstrukcije uzeta predložena vrijednost iz znanstvenog rada, i stoga je debljina jednog sloja 0,2875 mm. Zatim je odlučeno da će slojevi tanjeg dijela kompozitne konstrukcije biti 0,1 mm tanji, što znači da je ukupna debljina lima za šesnaest slojeva 3 mm.

Debljine lima aluminijske konstrukcije dobivene su iteracijom koja polazi iz mase kompozitne konstrukcije. S obzirom da je osnova sudara koji se u ovom radu analizirao kinetička energija (jednadžba 3.4), a cilj je bio imati istu količinu kinetičke energije zadanu na početku svih numeričkih simulacija, masa kompozitne i aluminijske konstrukcije morala je biti ista, uz također istu brzinu. U softveru *Abaqus* izračunata je masa kompozitne konstrukcije 23,2 kg, što je automatski onda i masa aluminijske konstrukcije. Daljnjom iteracijom debljine lima dobiveno je da će aluminijska konstrukcija za zadanu geometriju sa slike 33. imati masu 23,2 kg, ako su debljine pojedinih dijelova konstrukcije prethodno navedene vrijednosti.

Na slici 36. prikazan je sklopni postav numeričke simulacije.







Slika 36. Sklopni postav numeričke simulacije

#### 4.1.2. Rubni uvjeti numeričkog modela

Uz zaštitnu konstrukciju modelirana je i kruta barijera te krute pločice.

Kruta barijera predstavlja betonski zid koji se obično koristi u *Crash* testovima. Ona je modelirana 10 mm ispred zaštitne konstrukcije (vidljivi iz slike 36.) U stvarnosti vozilo bi se neko vrijeme gibalo i ubrzavalo prema zidu, ali u svrhu simulacije dovoljno je modelirati kratki vremenski period prije samog kontakta vozila i zida. Na taj način se dobiva kraće vrijeme trajanja simulacije i manje izlaznih podataka za procesiranje. Kruta barijera modelirana je kao *Rigid Body* opcija te su joj sve materijalne točke svedene i uklještene u *Reference Point 1*. Tako modeliranom tijelu materijalna svojstva su zanemarena, neće preuzeti ni naprezanje ni energiju od vozila, i neće se gibati pod naletom vozila.

Krute pločice spojene na krajeve uzdužnih nosača predstavljaju ostatak vozila. Bilo je potrebno predložiti model koji će uzeti u obzir nalet zaštitne konstrukcije svojom masom od 23,2 kg, a i inerciju ostatka vozila prilikom udara. Bilo bi pogrešno da je taj ostatak mase stavljen zajedno s masom zaštitne konstrukcije, jer onda ne bi došlo do utjecaja inercije ostatka vozila na zaštitnu konstrukciju. Zato su stavljene krute pločice koje u svojim *Reference Points 2 i 3* imaju po pola pretpostavljene mase ostatka vozila. Pretpostavljena masa vozila je 1200 kg, a onda su jednake polovice koje su stavljene u *Reference Points 2 i 3* mase od 600 kg. To je nešto manja masa od uobičajene mase sportskog vozila (1600-2000 kg), ali u svrhu smanjenja vremena simulacije odlučeno je pratiti ovaj pristup. Krute pločice spojene su kruto na nosače, to jest preko opcije *Interaction – Ties*.

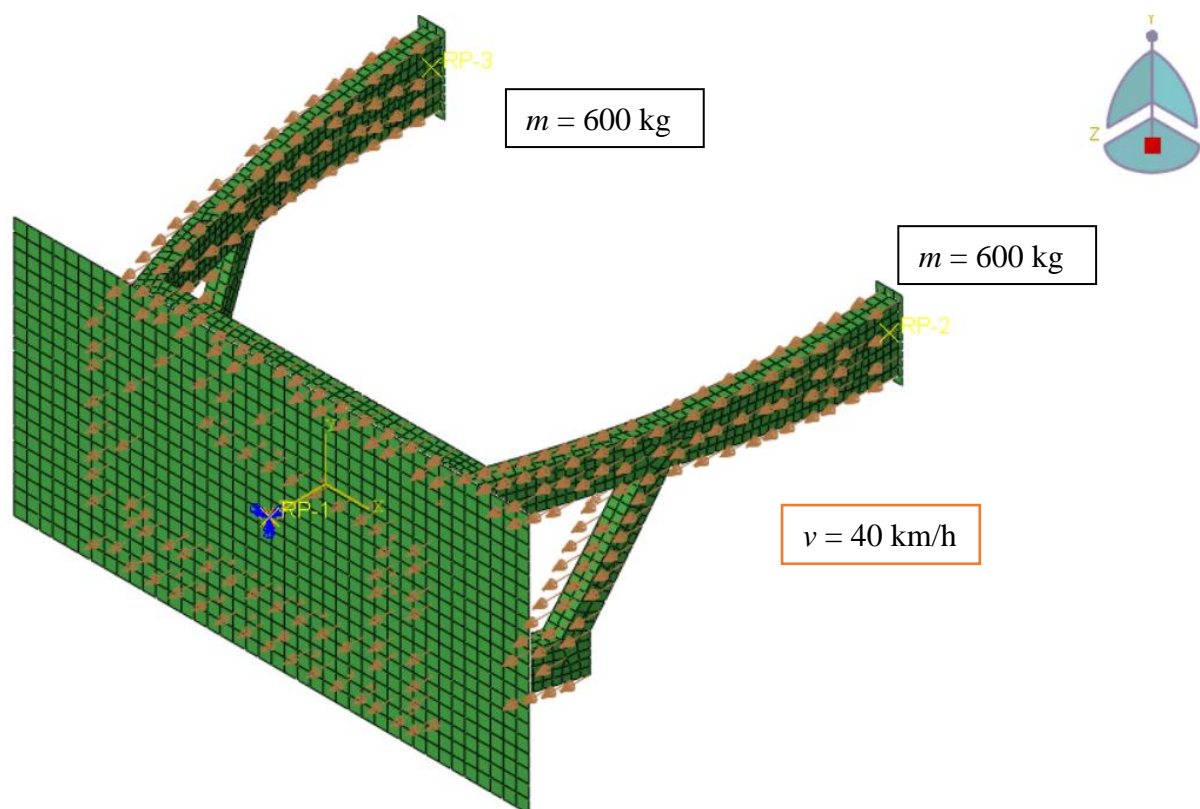


U svim točkama zaštitne konstrukcije pretpostavljena je početna brzina (komponenta osi z) od 40 km/h. Ta brzina stavljena je i u masu na krutim pločicama u svrhu dobivanja efekta djelovanja inercije ostatka automobila na prednju konstrukciju (i u konačnici na rezultate udarnog opterećenja). Brzina je zadana preko modula *Initial Velocity in Predefined Field*, te će se iz nje nakon kontakta spontano generirati trenutna brzina. Iz brzine i mase pojedinih dijelova sklopa analitički se može doći do početne vrijednosti kinetičke energije u sustavu:

$$E_k = \frac{(1200+23,2) \cdot 11,11^2}{2} = 75 \text{ kJ.} \quad (4.1)i$$

Kao i u eksperimentalnoj validaciji slobodni kontakt među dijelovima zadan je kao *General Contact*, s istom definicijom normalne i tangencijalne komponente kontaktne sile.

Rubni uvjeti prikazani su na slici 37.



**Slika 37. Rubni uvjeti sklopnog postava**

#### 4.1.3. Mreža numeričkog modela i iznos analiziranog vremena

Mreža zaštitne konstrukcije vidljiva je iz slike 33. Definirana je s 5127 *Conventional Shell* elemenata. Tip korištenih elemenata je *S4R*. Mreža krute barijere definirana je s 5104 *R3D4* ljuskasta elementa, dok je mreža pločica definirana s 44 elementa istog tipa. Ova gustoća mreže dala je zadovoljavajuću konvergenciju mjerenih veličina.

Analizirano vrijeme također je određeno iterativno. Odlučeno je uzeti vrijednost analiziranog vremena 50 ms te u tom vremenskom periodu pratiti iznose energije i ostalih fizikalnih veličina

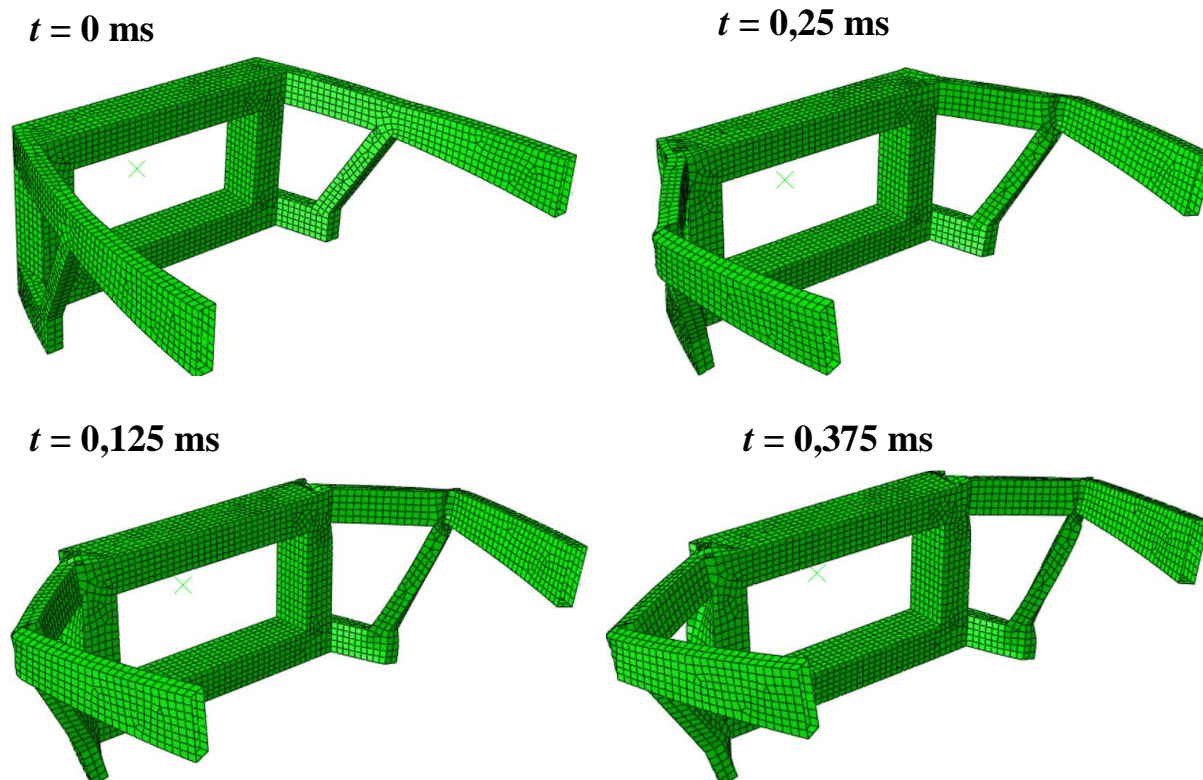
kroz otprilike 25000 inkremenata i 40 izlaznih koraka zapisa za sve konfiguracije. Analizom rezultata zaključeno je da je odabrani iznos analiziranog vremena dovoljan za dobivanje potrebnih zaključaka u ovom diplomskom radu, a da bi za apsorpciju cijelog iznosa inicijalne kinetičke energije (75 kJ) bilo potrebno modelirati sve dijelove konstrukcije automobila koji sudjeluju u tom procesu, što je izvan okvira diplomskog rada.

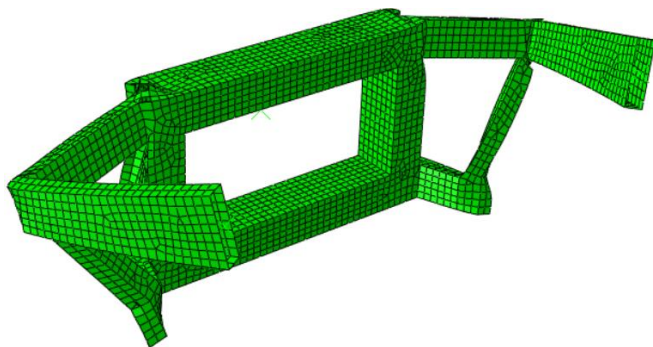
## 4.2. Rezultati numeričke simulacije

U svrhu analize ponašanja različitih konfiguracija kompozitnog materijala i aluminijske legure uslijed udarnog opterećenja analizirana su ekvivalentna von Mises naprezanja, deformacije, apsorpcija kinetičke energije i varijable oštećenja.

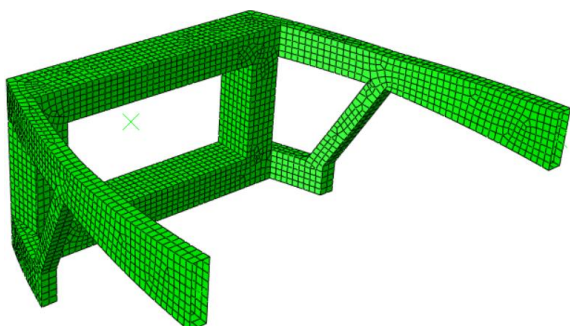
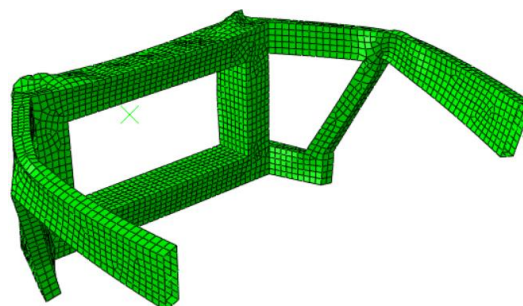
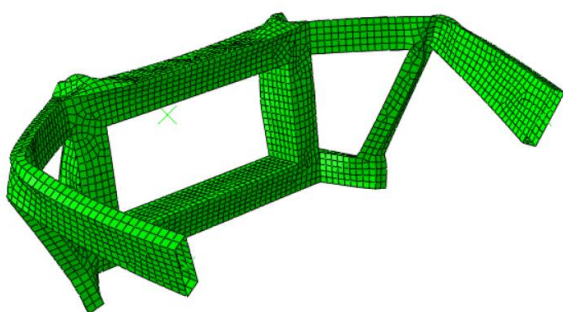
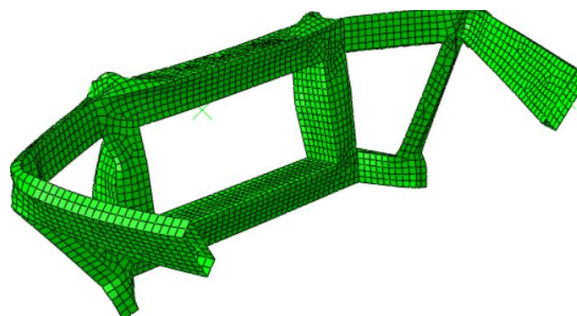
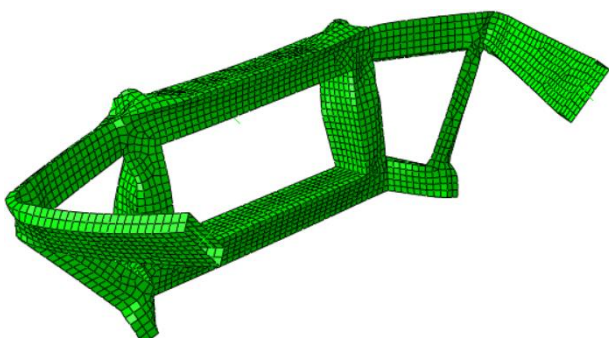
### 4.2.1. Deformirani model

Na slici 38. i 39. prikazan je tijek deformiranja zaštitne konstrukcije u pet vremenskih trenutaka za kompozitnu i aluminijsku konstrukciju. S obzirom slično ponašanje pri deformiranju uslijed opterećenja između različitih konfiguracija kompozita, za kompozitnu konstrukciju biti će prikazan samo prvi sloj prve konfiguracije. Vremenski trenutak  $t = 0$  ms označava trenutak početka simulacije.



$t = 0,5 \text{ ms}$ 

Slika 38. Tijek deformiranja kompozitne zaštitne konstrukcije

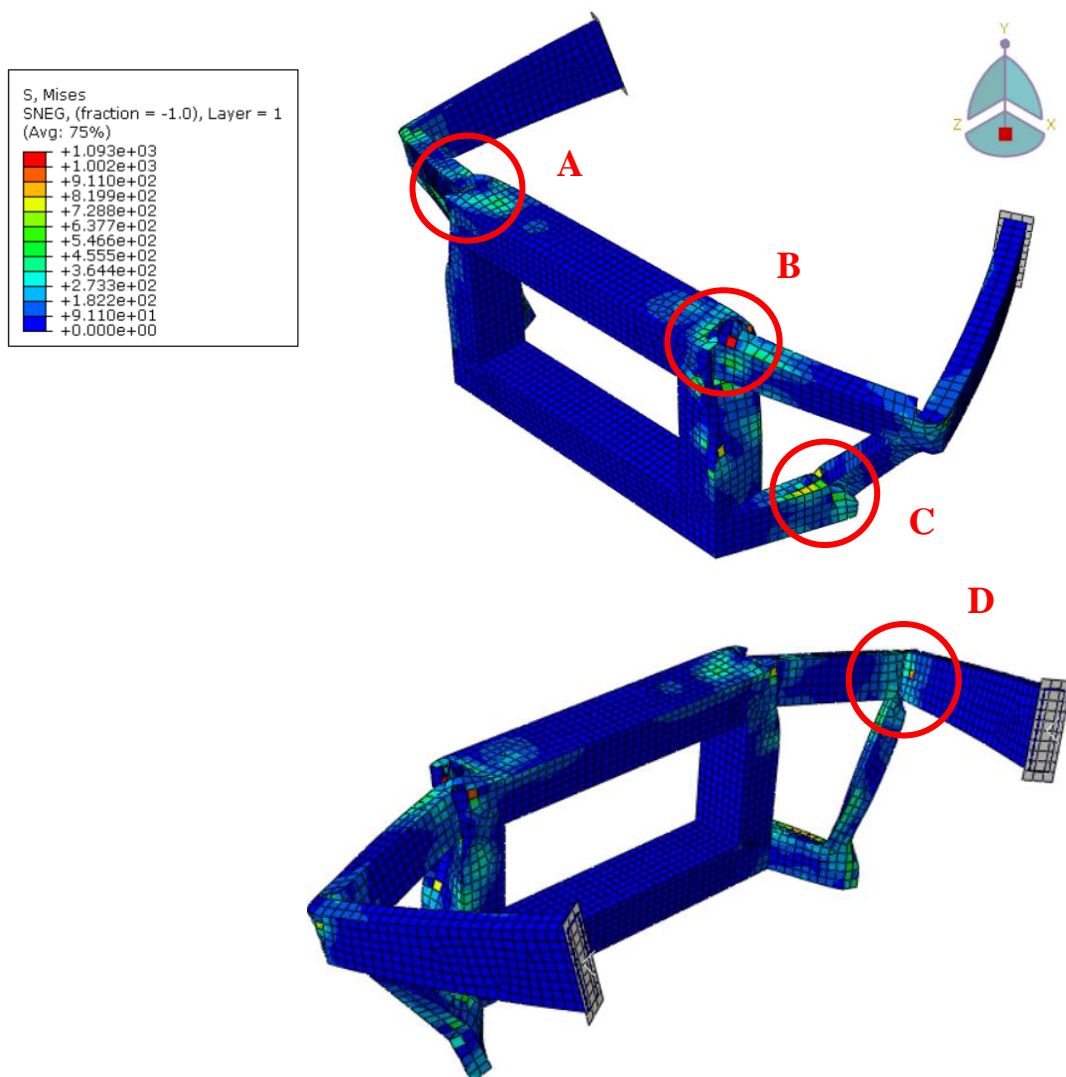
 $t = 0 \text{ ms}$  $t = 0,25 \text{ ms}$  $t = 0,125 \text{ ms}$  $t = 0,375 \text{ ms}$  $t = 0,5 \text{ ms}$ 

Slika 39. Tijek deformiranja aluminijske zaštitne konstrukcije

Iz slika 38. i 39. vidljivo je da je aluminijska konstrukcija više deformirana od kompozitne – uzdužni nosači su joj više zakrenuti s obzirom na ravnotežni položaj, a nastupilo je i gnječenje površine branika. Na prvu se pretpostavlja da je aluminijska legura apsorbirala više neelastične energije za vrijeme sudara, ali to će se kasnije moći potvrditi analizom energija u sustavu.

#### 4.2.2. Analiza ekvivalentnih von Mises naprezanja

Nadalje će biti analizirana ekvivalentna Von Mises naprezanja. S obzirom na količinu izlaznih podataka, prvo je bilo potrebno ustanoviti u kojem se dijelu konstrukcije javljaju koncentracije naprezanja kako bi naglasak analize bio na njima. Na slici 40. prikazana je raspodjela ekvivalentnih von Mises naprezanja za prvu konfiguraciju kompozita, za prvi sloj (orientacija vlakana  $0^\circ$ ), sa zaokruženim koncentracijama naprezanja. Nije potrebno ostale konfiguracije i slojeve prikazivati jer je ustanovljeno da je raspodjela koncentracija naprezanja u svakom sloju za svaku konfiguraciju ista.

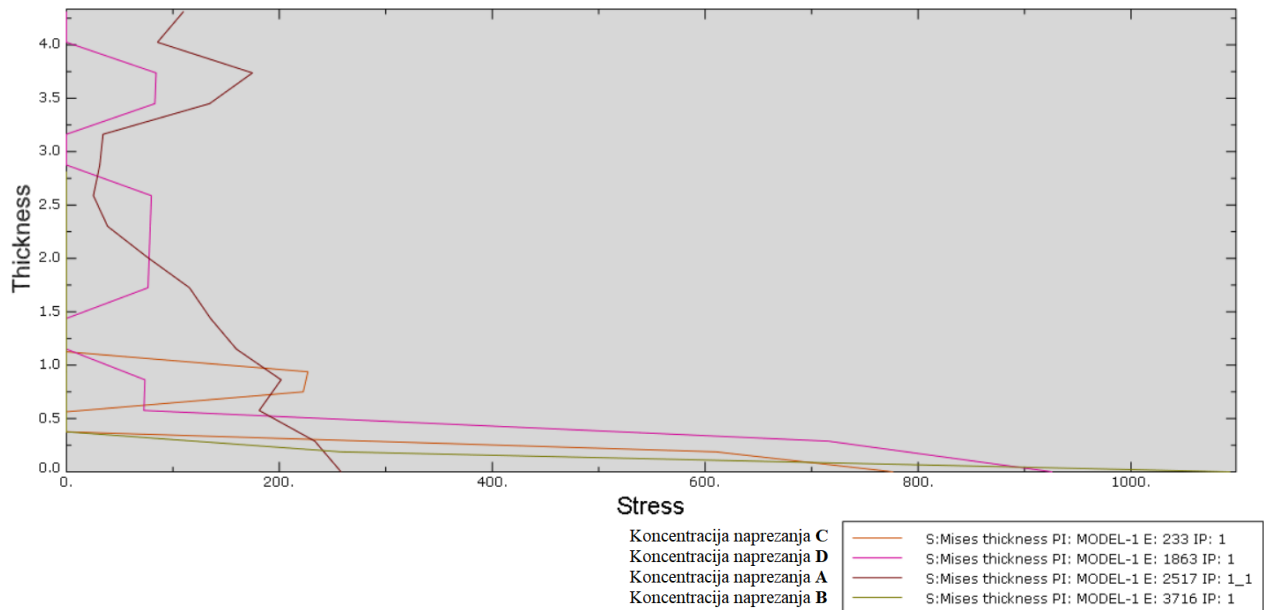


**Slika 40. Koncentracije ekvivalentnih von Mises naprezanja [MPa] na zaštitnoj konstrukciji u trenutku  $t = 50$  ms**

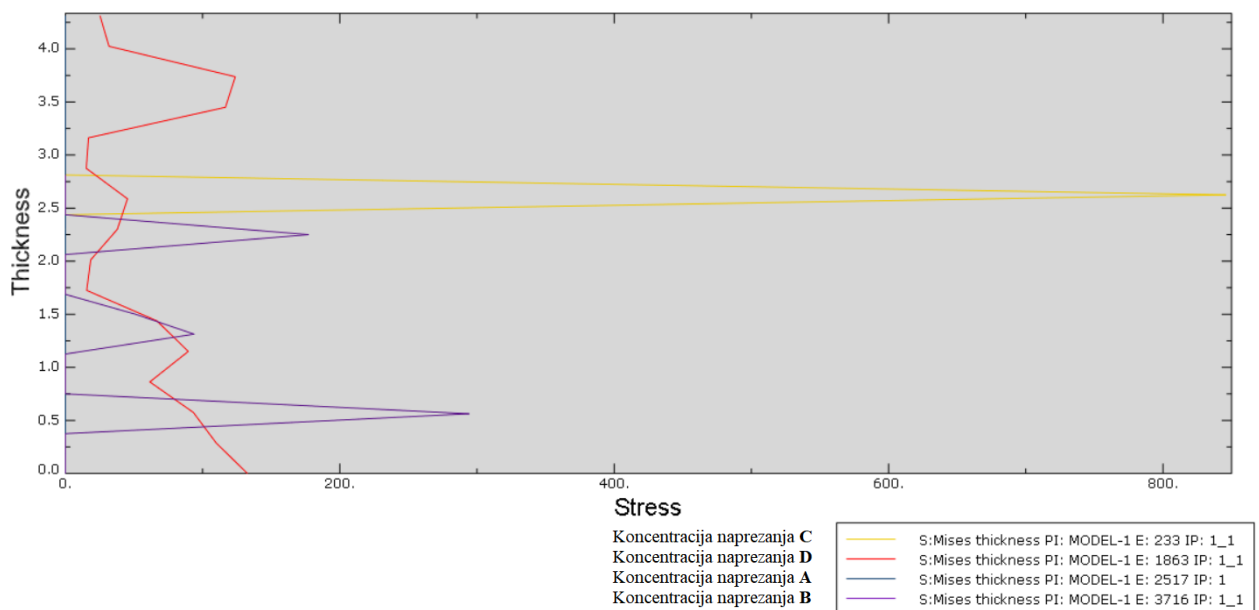


Iz slike 40. očito je da su koncentracije naprezanja najveće na mjestima spajanja uzdužnih nosača s branikom. Ta pretpostavka vrijedi za sve konfiguracije i za sve slojeve. Na slici 40. označena su mjesta koncentracije naprezanja za koje će biti prikazana raspodjela naprezanja po slojevima za kompozitne konfiguracije – A, B, C i D.

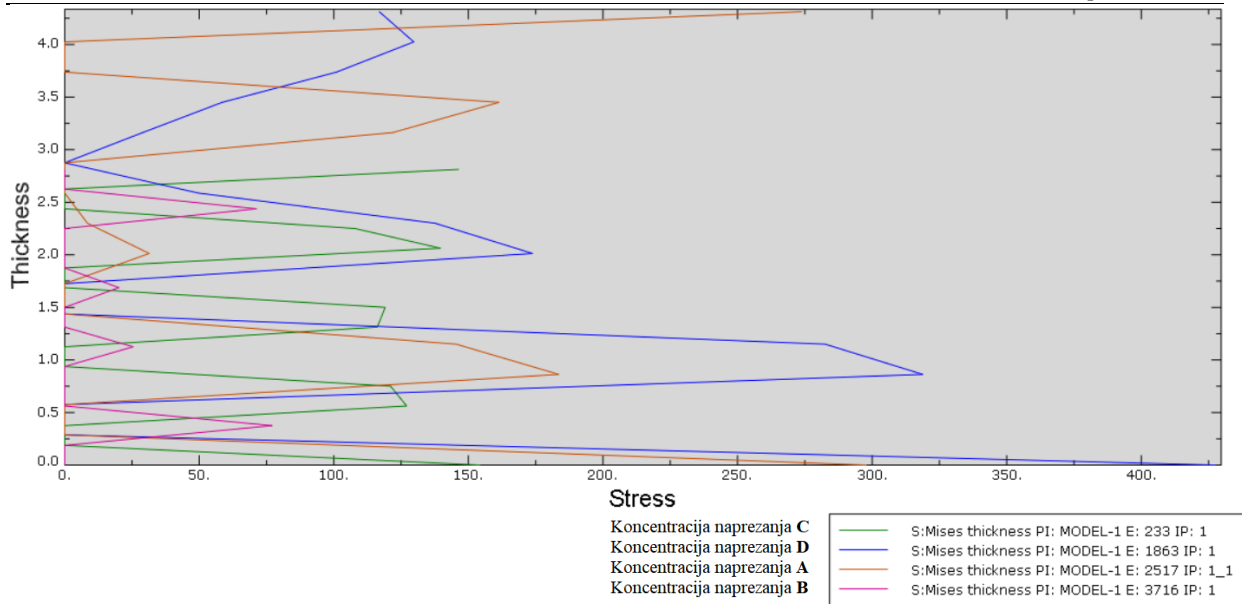
Nadalje je prikazano na slikama 41.-45. prikaz raspodjele ekvivalentnih von Mises naprezanja po debljini stijenke zaštitne konstrukcije.



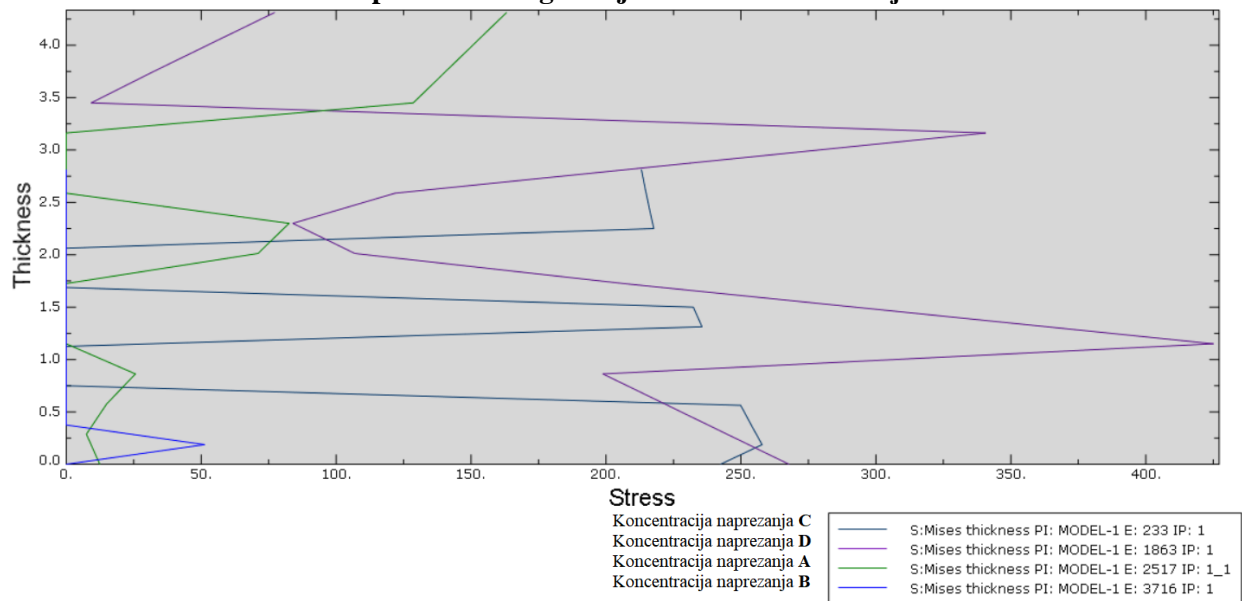
**Slika 41. Raspodjela ekvivalentnih von Mises naprezanja [MPa] po debljini [mm] stijenke za prvu kompozitnu konfiguraciju zaštitne konstrukcije**



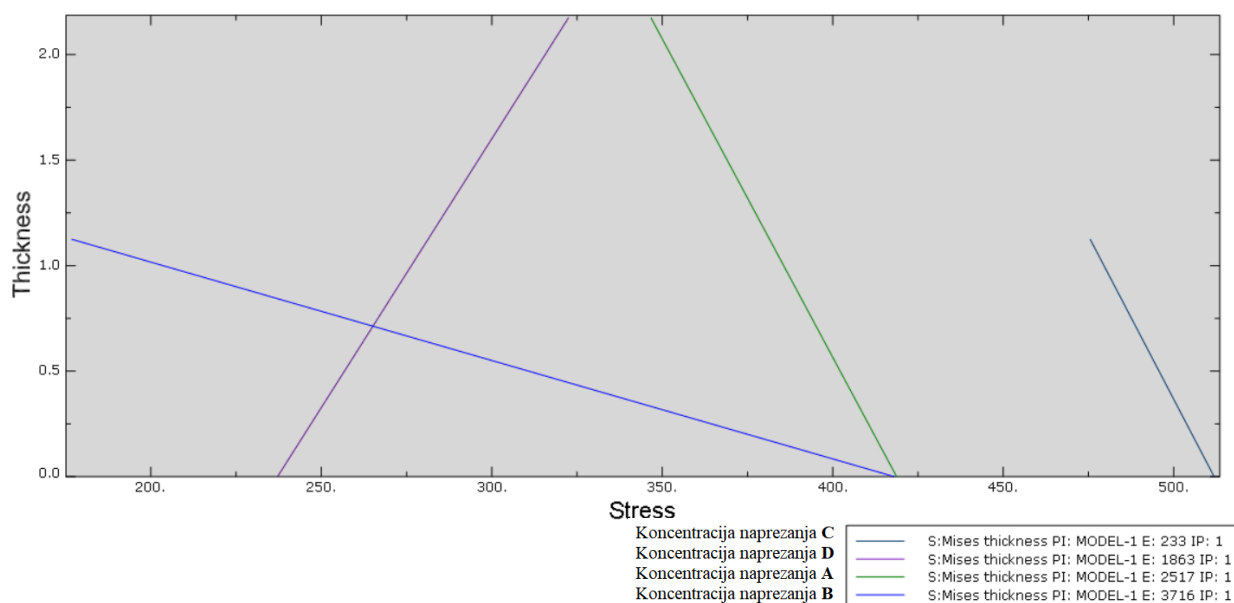
**Slika 42. Raspodjela ekvivalentnih von Mises naprezanja [MPa] po debljini stijenke [mm] za kompozitnu konfiguraciju zaštitne konstrukcije**



**Slika 43. Raspodjela ekvivalentnih von Mises naprezanja [MPa] po debljini [mm] stijenke za kompozitnu konfiguraciju zaštitne konstrukcije**



**Slika 44. Raspodjela ekvivalentnih von Mises naprezanja [MPa] po debljini [mm] stijenke za kompozitnu konfiguraciju zaštitne konstrukcije**



**Slika 45. Raspodjela ekvivalentnih von Mises naprezanja [MPa] po debljini [mm] stijenke za aluminijsku zaštitnu konstrukciju**

Iz priloženih slika 41.-45. mjesto koncentracije naprezanja B ispada najveće od svih numerički izračunatih simulacija, ali samo u prvoj konfiguraciji. U ostalim konfiguracijama najveće je naprezanje na mjestu koncentracije naprezanja D. Zaključak je da će naprezanja na kompozitnoj konstrukciji biti veća u odnosu na istovjetnu aluminijsku pri jednakom opterećenju, a razlog tome je veća čvrstoća i krutost kompozitnog materijala.

#### 4.2.3. Analiza energija u sustavu

U tablici 8. prikazana je raspodjela energije zaštitne konstrukcije u krajnjem vremenu simulacije ( $t = 50$  ms) za sve konfiguracije.

**Tablica 8. Raspodjela energije zaštitne konstrukcije u krajnjem vremenu simulacije ( $t = 50$  ms) za sve konfiguracije**

Konfiguracija	Udarna (kinetička) energija	Unutarnja energija	Energija elastičnog deformiranja	Disipirana energija oštećenja	Energija neelastičnog deformiranja
Prva	75 kJ	13,6 kJ	9,9 kJ	3,6 kJ	0 J
Druga	75 kJ	12 kJ	8,6 kJ	3,3 kJ	0 J
Treća	75 kJ	11,9 kJ	8,3 kJ	3,6 kJ	0 J
Četvrta	75 kJ	14,1 kJ	10,4 kJ	3,6 kJ	0 J
Aluminij	75 kJ	26,6 kJ	5,2 kJ	0 J	21,4 kJ

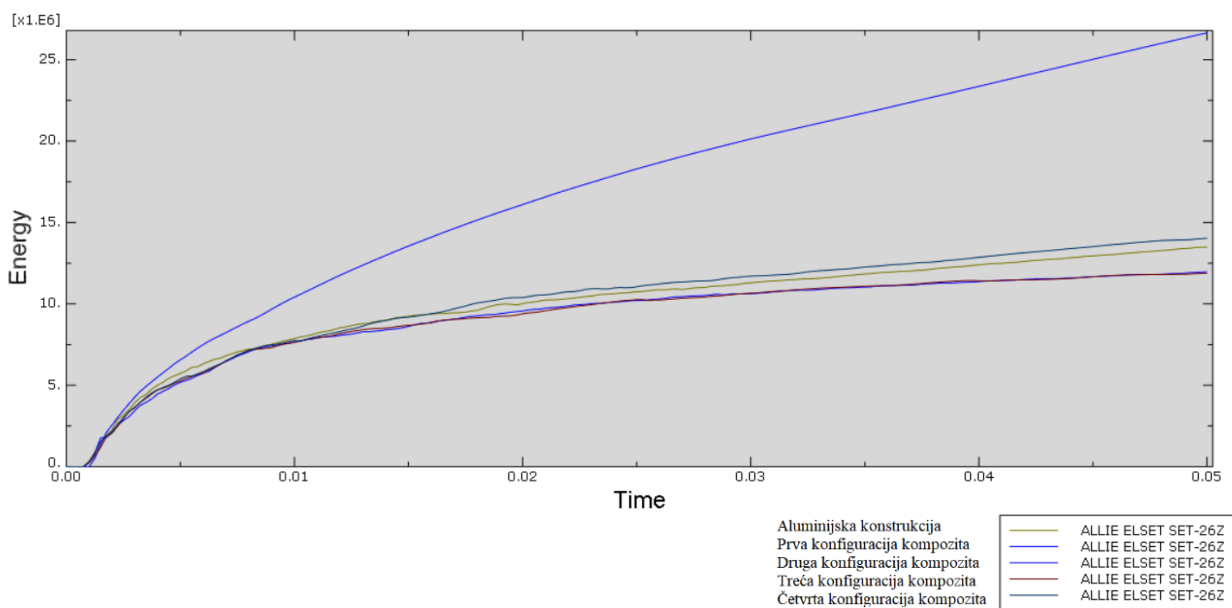
Iz tablice 8. vidljivo je da je aluminijska legura apsorbirala veći udio kinetičke energije od kompozitne konstrukcije, i to otprilike dva puta. To je pretpostavljeno ranije prilikom analize

deformacija konstrukcije. S druge strane, za istu masu konstrukcije kompozitna izvedba biti će puno kruća i čvršća, tako da će se i manje deformirati, i naposljetku apsorbirati kinetičku energiju. Zapravo bi se prava usporedba aluminijske i kompozitne zaštitne konstrukcije mogla napraviti tek kada bi imali sve elemente vozila uključene u analizu.

Iz slike 38. i 39. vidljivo je da su uzdužni nosači izraženo najdeformiraniji dio konstrukcije te su deformiraniji više kod aluminijske konstrukcije nego kod kompozitne. Iz toga se zaključuje da je deformacija uzdužnih nosača u modelu mjerodavan pokazatelj apsorbaranja energije ukupne konstrukcije.

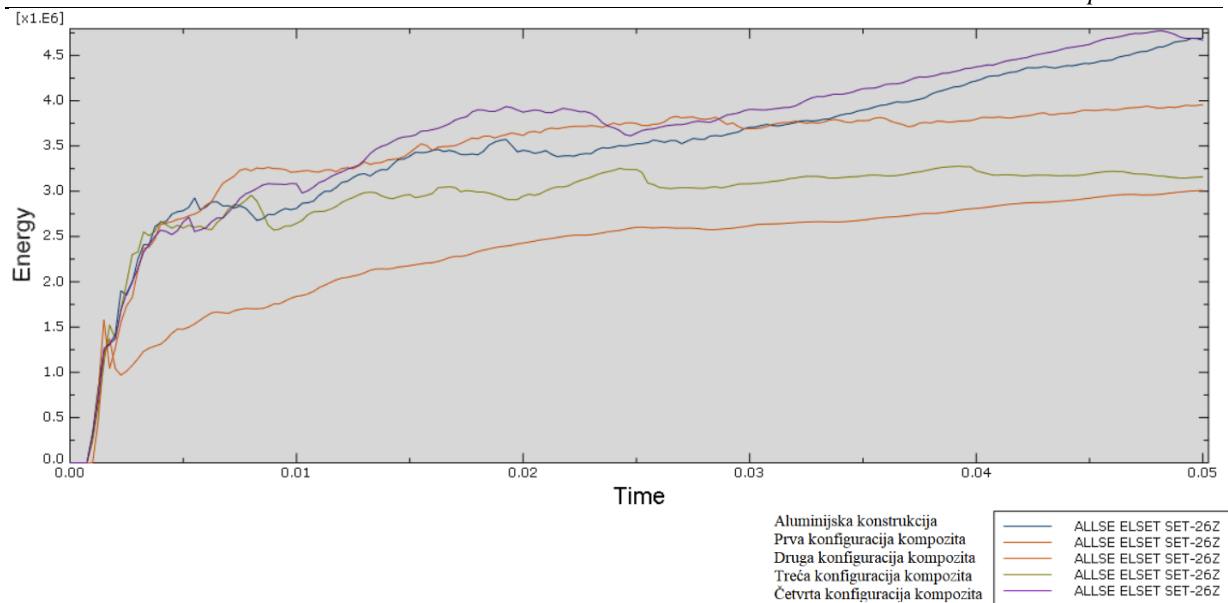
Kod kompozitne konstrukcije vidljivo je da dvije trećine apsorbirane energije odlazi na energiju elastičnog defomiranja, a jedna trećina na propagaciju oštećenja. Kod aluminijske konstrukcije apsorbirana energije raspodjeljuje se uglavnom na energiju neelastičnog deformiranja, što je i logično zbog svojstva ponašanja aluminija u plastičnom području.

Na slikama 46.-49. prikazane su opisane energije u ovisnosti u vremenu za sve navedene konfiguracije.

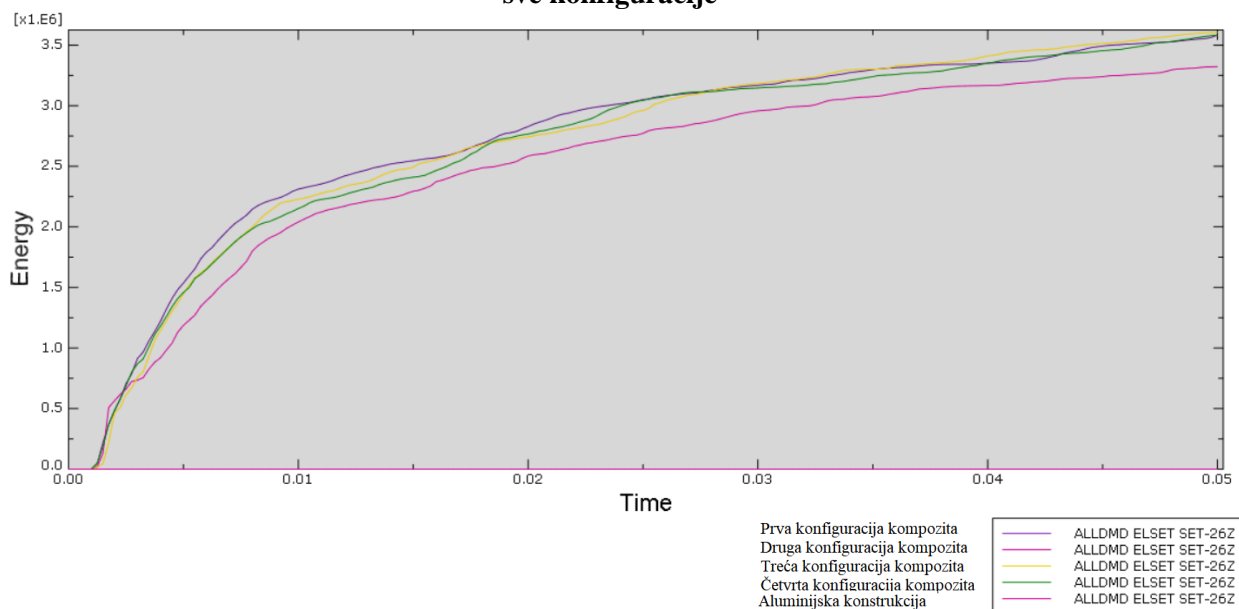


**Slika 46. Ovisnost unutarnje energije zaštitne konstrukcije [mJ] o vremenu [s] za sve konfiguracije**

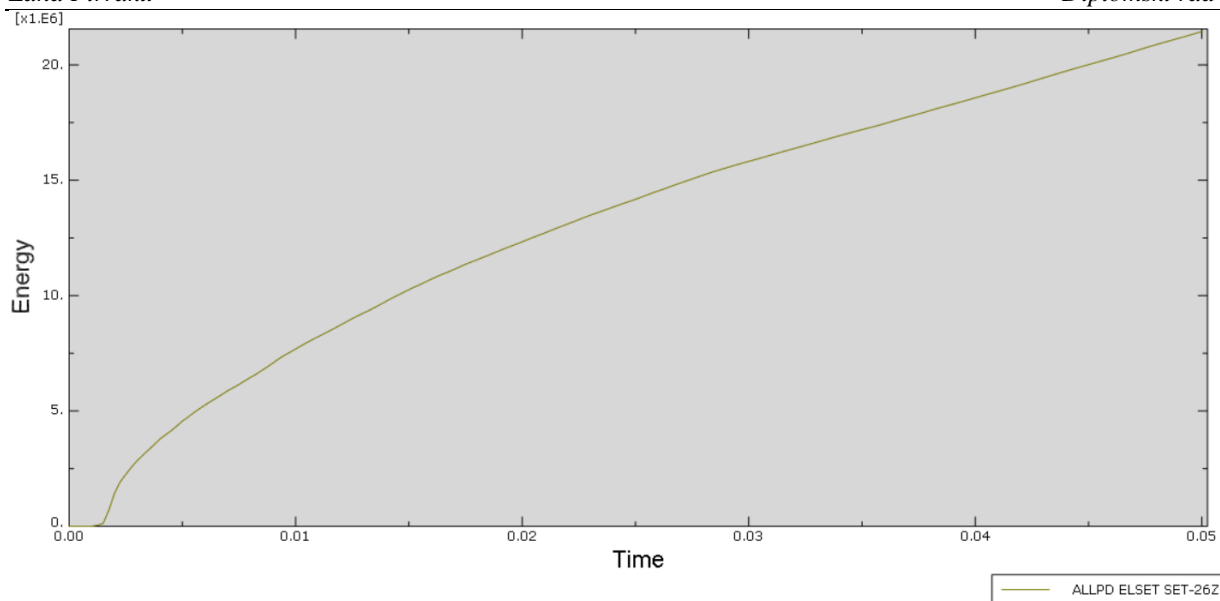




**Slika 47. Ovisnost elastične energije deformiranja zaštitne konstrukcije [mJ] o vremenu [s] za sve konfiguracije**



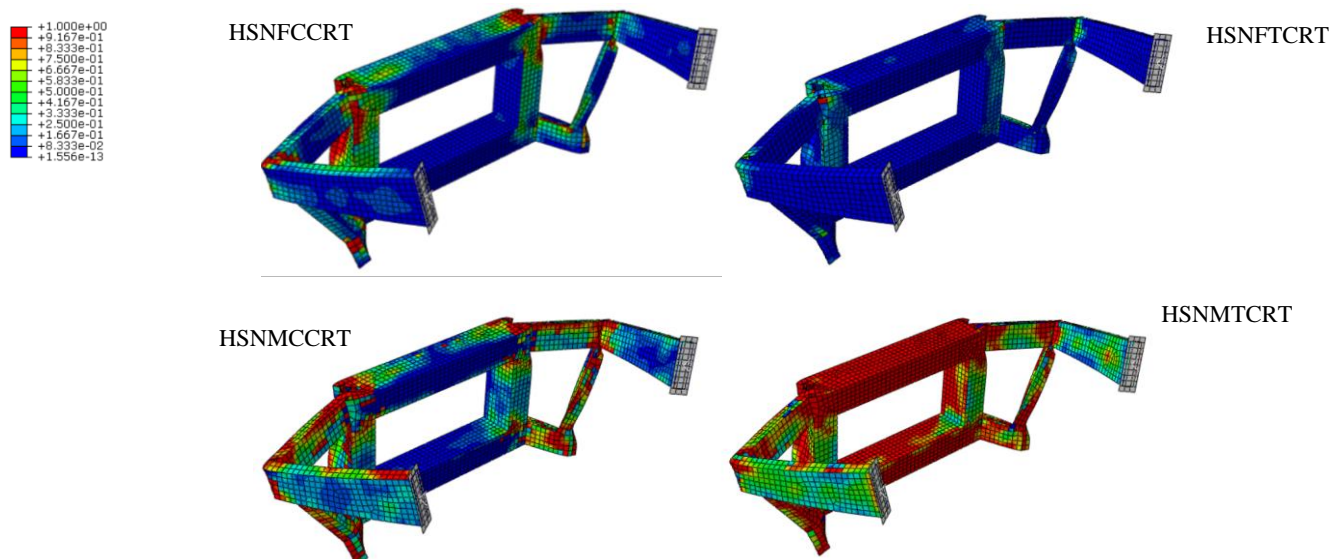
**Slika 48. Ovisnost disipirane energije oštećenja zaštitne konstrukcije [mJ] o vremenu [s] za sve konfiguracije**



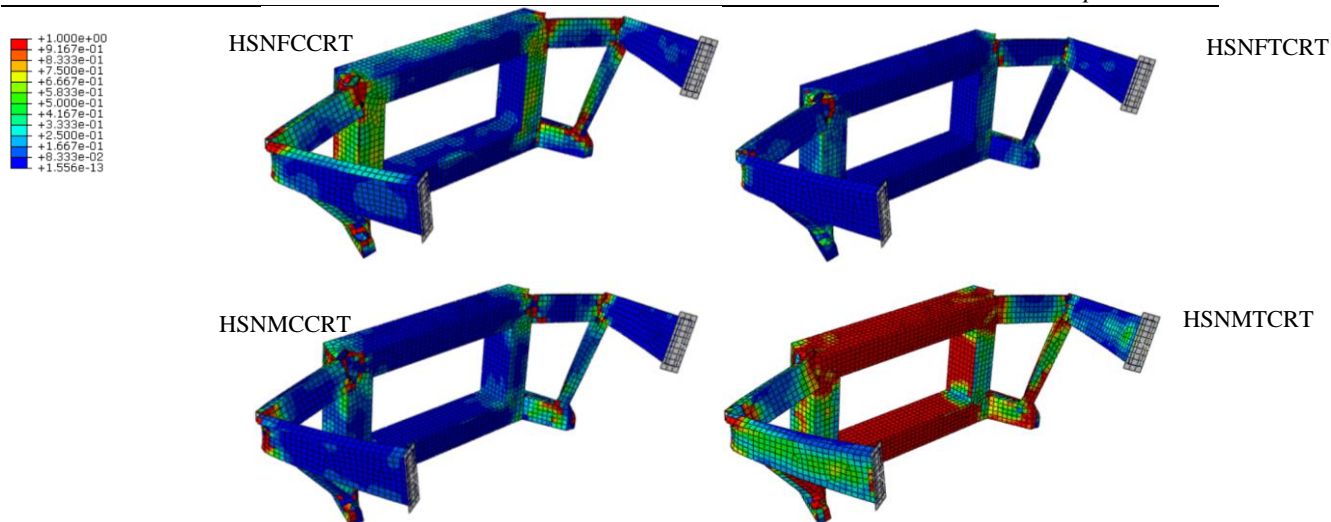
**Slika 49. Ovisnost energije plastične deformacije [mJ] zaštitne aluminijske konstrukcije o vremenu [s]**

#### 4.2.4. Oštećenje zaštitne konstrukcije

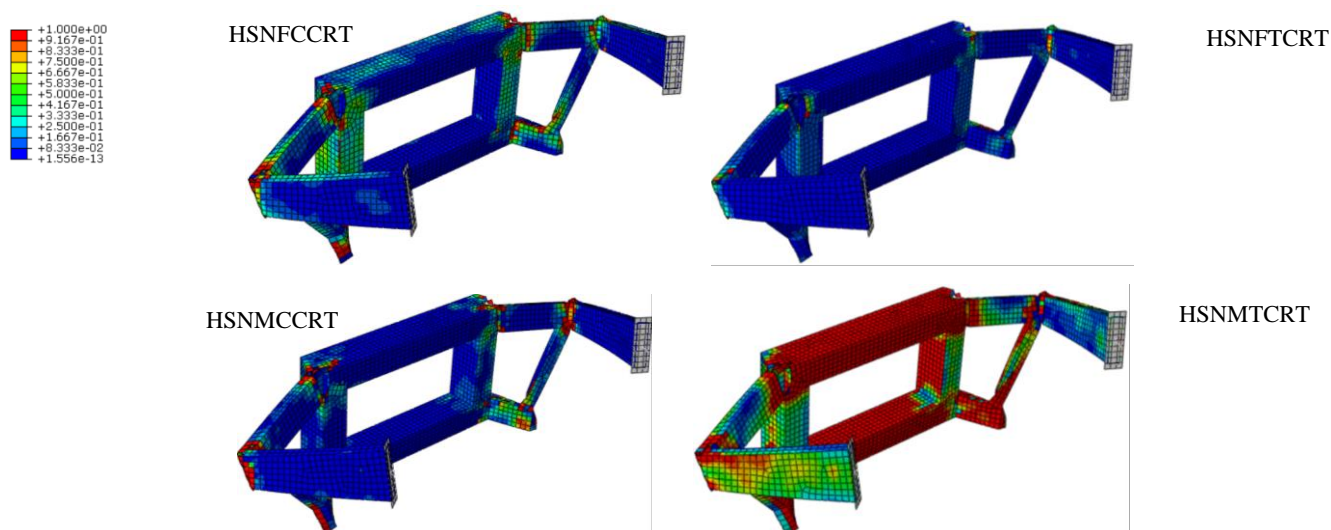
Oštećenje zaštitne kompozitne konstrukcije prikazano je na slikama 50.-53. Za svaku konfiguraciju pojedinačno prikazana su četiri Hashinova modula oštećenja.



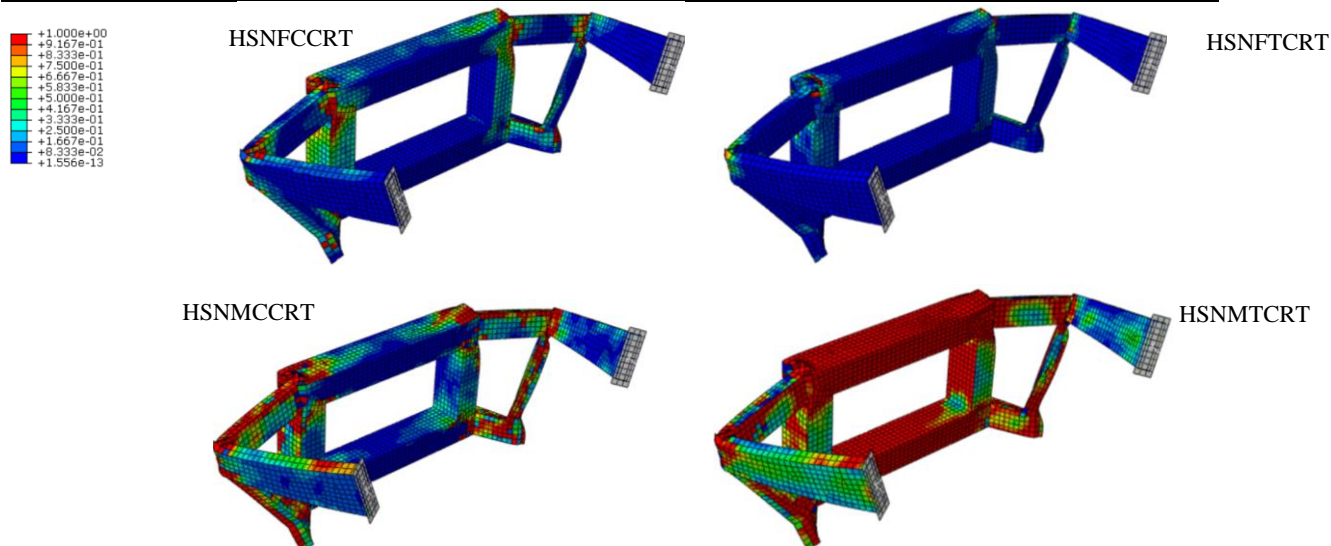
**Slika 50. Raspodjela Hashinovih kriterija inicijacije oštećenja [-] za prvu konfiguraciju kompozita**



Slika 51. Raspodjela Hashinovih kriterija, inicijacije oštećenja [-] za drugu konfiguraciju kompozita



Slika 52. Raspodjela Hashinovih kriterija inicijacije oštećenja [-] za treću konfiguraciju kompozita



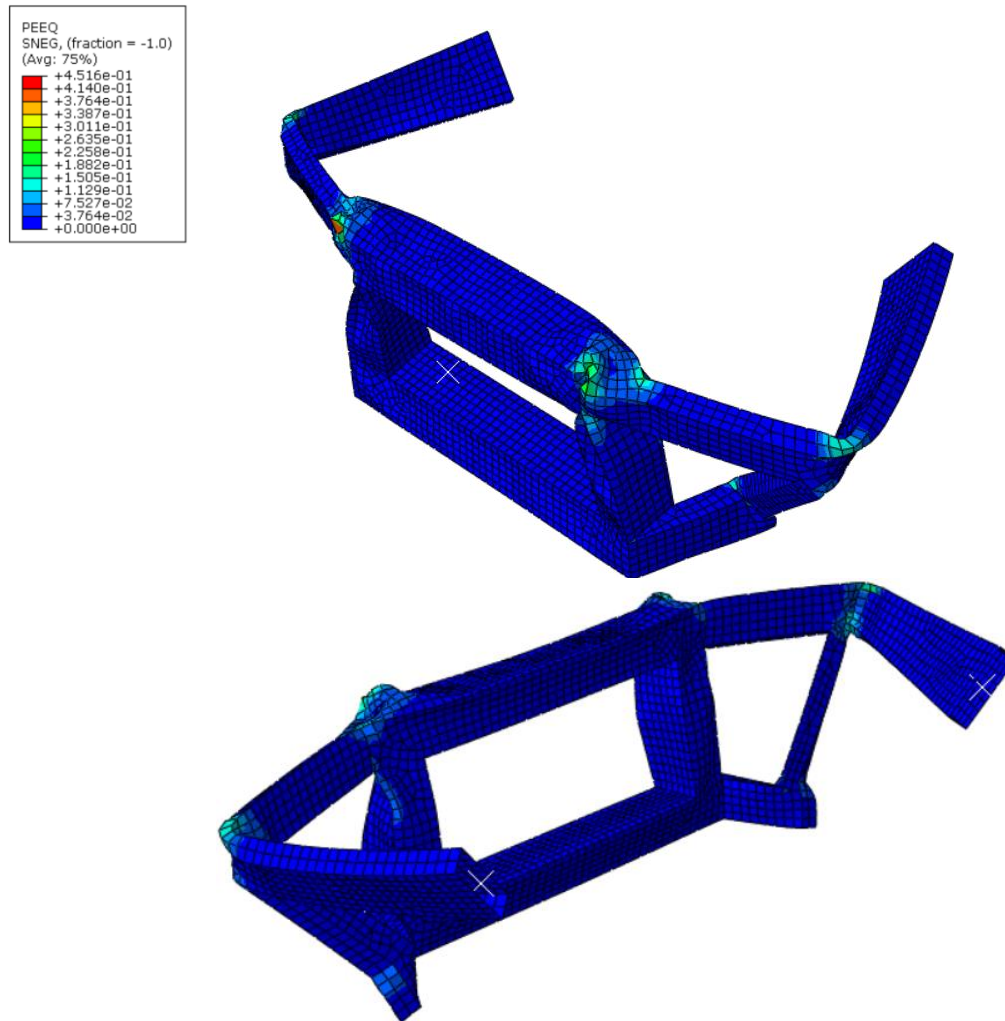
**Slika 53. Raspodjela Hashinovih kriterija inicijacije oštećenja [-] za četvrtu konfiguraciju kompozita**

Što se tiče oštećenja vlakana, ona su najviše prisutna u na mjestima spajanja uzdužnog nosača i branika, to jest na mjestima gdje se javljaju kontakti različitih orijentacija vlakana. Iz prikaza je vidljivo da su vlakna uglavnom opterećena vlačno, što znači da je deformacija konstrukcije uglavnom u smjeru razvlačenja vlakana.

Matrica je pak uglavnom tlačno opterećena. To je i logično jer je riječ o sudaru dva tijela, a kako matrica popunjava prostor između vlakana direktno je izložena udarnom opterećenju koje se onda manifestira kao tlačno.

Oštećenje aluminijske legure ne propagira se na isti način kao i kod kompozita. Kako je aluminij sklon plastičnoj deformaciji, kod njega je mjerodavna varijabla PEEQ, *Equivalent plastic strain*, koja daje informaciju o tome je li došlo do plastične deformacije. U tablici 7. definirana je plastičnost za aluminijsku leguru, te se iz nje može zaključiti da će se aluminijska legura ponašati idealno plastično iznad postignute plastične deformacije od 0,171 pri 544 MPa naprezanja. Teoretski bi kod te vrijednosti došlo do loma i konstrukcija bi popustila, ali onda bi se i cijela konstrukcija deformirala na drugačiji način. S druge strane, takva detaljnija analiza prelazila bi okvire rada te se u ovom slučaju neće razmatrati.

Na slici 54. prikazana je raspodjela ekvivalentne plastične deformacije po aluminijskoj konstrukciji.



Slika 54. Raspodjela ekvivalentne plastične deformacije [-] po aluminijskoj konstrukciji

## 5. ZAKLJUČAK

U ovom radu bilo je potrebno modelirati pojednostavljenu kompozitnu konstrukciju i analizirati kako različite konfiguracije kompozitnih materijala apsorbiraju kinetičku energiju pri udaru. Uzet je primjer zaštitne konstrukcije vozila, eng. *Crash Structure*, i za nju je simuliran eng. *Crash Test*, to jest frontalni sudar s krutom barijerom. Također je analizirana i istovjetna konstrukcija izrađena od aluminijske legure, još jednog često upotrebljavanog materijala u proizvodnji vozila.

Zaključeno je da se početna kinetička energija sustava pretvara u nekoliko drugih oblika energije zaštitne konstrukcije; u unutarnju energiju, u disipacijsku energiju oštećenja za kompozit, to jest energiju plastične deformacije za aluminijsku leguru, te elastičnu energiju deformacije. Numerička simulacija pokazala je da aluminijska legura bolje apsorbira kinetičku energiju od kompozita te je to vidljivo većom deformacijom konstrukcije. Također između različitih konfiguracija kompozita postoje razlike u apsorpciji energije, ali zanemarivo male. Što se tiče same veće deformacije aluminijske konstrukcije u usporedbi s kompozitnom konstrukcijom, razlog tome leži u većoj čvrstoći i krutosti kompozita.

Simulacija udarnog opterećenja dokazala je da će doći do oštećenja i vlakana i matrice kompozitne konstrukcije. Zanimljivo je da će oštećenje vlakana biti vlačno, a oštećenje matrice tlačno. Razlog tome je što su vlakna postavljena uzdužno po elementima od kojih je građena konstrukcija i oni se pri deformiranju rastežu, dok je matrica opterećena tlačno uslijed kontaktnog udara koji mora biti tlačan. Najveća je koncentracija oštećenja na spojnim mjestima. Rezultati ovog rada mogu poslužiti kao okvirni pokazatelji načina apsorpiranja kinetičke energije pri udaru te propagacije oštećenja uzrokovane udarom, ali ne mogu dati potpune zaključke o utjecaju rasporeda slojeva na izlazne podatke simulacije. Razlog tome je izostavljanje ostalih dijelova vozila u proračun koji bi preuzeli dio udarnog opterećenja, npr. motor. Sljedeći korak bio bi diskretizirati motor na neki način, s obzirom da on preuzima do 20 % udarnog opterećenja, te vidjeti koliko rezultati takve simulacije odudaraju od ovih.

Što se tiče dobivanja modela kompozitne konstrukcije koji optimalno apsorbira kinetičku energiju, tu se predlaže model koji je sastavljen od različitih rasporeda slojeva, ovisno o dijelu konstrukcije za koji se on primjenjuje. Ta konfiguracija bi ovisila o izloženosti konstrukcije određenom opterećenju (tlak, vlak, savijanje), i na taj način bi se orijentirali pojedini slojevi, s obzirom da određena orijentacija slojeva povećava ili umanjuje pojedina svojstva.



**LITERATURA**

- [1] Smojver, I.: *Mehanika kompozitnih materijala*, Zagreb, 2006./2007., interna skripta
- [2] Tri-Dung Ngo: *Introduction to Composite Materials*, 2020., InetechOpen, Alberta, Canada, 2020.
- [3] <https://formlabs.com/eu/blog/composite-materials-carbon-fiber-layup/>, 10.10.2023.
- [4] <https://support.jamestowndistributors.com/hc/en-us/articles/360053114013-What-s-the-difference-between-epoxy-resin-polyester-resin-and-vinyl-ester-resin->, 10.10.2023.
- [5] Zhang W., Xu J.: *Advanced Lightweight Materials for Automobiles: A Review*, Materials & Design (Volume 221), 2022.
- [6] <https://www.stratviewresearch.com/articles/Leaf-Spring---An-Emerging-Application-in-Automotive-Composites> , 23.10.2023.
- [7] [https://en.wikipedia.org/wiki/Soybean\\_car](https://en.wikipedia.org/wiki/Soybean_car) , 12.11.2023.
- [8] [https://www.astonmartin.com/en-us/models/aston-martin-Valkyrie?body=Valkyrie+Coupe](https://www.astonmartin.com/en-us/models/aston-martin- Valkyrie?body=Valkyrie+Coupe) , 12.11.2023.
- [9] Vasiliev V.V., Mozorov E.V.: *Advanced Mechanics of Composite Materials and Structures (Fourth Edition)*, Elsevier Science, Moskva, 2018.
- [10] Aboudi J., Arnold S., Bednarczyk B.: *Practical Micromechanics of Composite Materials*, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2021.
- [11] Barbero E.J.: *Finite Element Analysis of Composite Materials Using Abaqus<sup>TM</sup>*, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2013.
- [12] Alfirević Ivo: *Nauka o čvrstoći II*, Golden Leaf Tours, Zagreb, 1999.
- [13] Latinčić J.: *Numeričko modeliranje naprezanja uslijed udarnog opterećenja*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, završni rad, 2021.
- [14] <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/abaqusexplicit/> , 15.11.2023.
- [15] Ding Y., Liu J., Hall Z.E.C., Brooks R.A., Liu H., Kinloch A.J., Dear J.P.: *Damage and Energy Absorption Behaviour of Composite Laminates Under Impact Loading Using Different Impactor Geometries*, Composite Structures (Volume 321), 2023.
- [16] Argüelles A., Vina I., Vigón P., Lozano M., Vina J.: *Study of the Fatigue Delamination Behaviour of Adhesive Joints in Carbon Fibre Reinforced Epoxy Composites, Influence of the Period of Exposure to Saline Environment*, Scientific Reports 12, 2022.
- [17] Vangi D.: *Vehicle Collision Dynamics*, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2020.
- [18] <https://www.autoevolution.com/news/how-crumple-zones-work-7112.html> , 25.11.2023.



- 
- [19] <https://cdn.euroncap.com/media/41747/euro-ncap-mpdb-testing-protocol-v10.201811061520121613.pdf> , 25.11.2023.
- [20] <https://www.mcdaniellawyers.com/posts/car-safety-features-built-for-men/> , 25.11.2023.
- [21] <https://drawingdatabase.com/porsche-911-carrera-s-2016/> 25.11.2023.
- [22] *Metalic Materials and Elements for Aerospace Vehicle Structures MILHDBK-5J*, Department of Defense Handbook, Atlantic City, 2003.