

# Numeričko modeliranje udarnih oštećenja kompozitne motociklističke kacige

---

**Dumančić, Kristina**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2021**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:899976>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*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**

**Kristina Dumančić**

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Student:

Izv. prof. dr. sc. Darko Ivančević, mag. ing. aeroing.

Kristina Dumančić

Zagreb, 2021.

*Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno, koristeći znanja stečena tijekom studija na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu i literaturu koja je citirana i navedena u popisu.*

*Neizmjerno se zahvaljujem mentoru Izv. prof. dr. sc. Darku Ivančeviću, mag. ing. aeroing. na prihvaćanju mentorstva, ukazanoj pomoći, strpljenju i svim sugestijama koje su znatno pridonijele kvaliteti ovog rada.*

*Zahvaljujem se svojoj obitelji i prijateljima koji su mi pružili ogromnu količinu podrške, a posebno se zahvaljujem mom Mislavu bez čije pomoći, truda i razumijevanja kroz sve godine studija, ovo sve ne bi bilo moguće.*

*Ovaj rad posvećujem svojim roditeljima koji me čuvaju i prate s nekog ljepšeg mjesta, vjerujem da ste ponosni.*

Kristina Dumančić



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

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Kristina Dumančić**

JMBAG: 0035204959

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Numeričko modeliranje udarnih oštećenja kompozitne motociklističke kacige**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Numerical modelling of composite motorcycle helmet impact damage**

Opis zadatka:

Mehaničko ponašanje i apsorpcija energije udara kompozitnih kaciga prilikom udarnog opterećenja kacige ovise o rasporedu slojeva i svojstvima materijala jezgre sendvič konstrukcije kacige. Prilikom numeričkog modeliranja udarnih oštećenja kacige potrebno je uzeti u obzir sve relevantne načine popuštanja kompozitne kacige kako bi se pouzdano modelirao proces apsorpcije energije udara.

U skladu s navedenim, u okviru diplomskog rada potrebno je:

- korištenjem dostupnih numeričkih modela kacige i biomehaničkog modela glave modelirati udarna opterećenja kacige u uvjetima definiranim standardima ispitivanja kaciga,
- numeričku analizu provesti korištenjem programa *Abaqus/Explicit*®,
- varirati materijale od kojih je izrađena kaciga s ciljem određivanja utjecaja na opterećenje koje se prenosi na biomehanički model glave,
- koristiti mehanička svojstva materijala koji se koriste za proizvodnju kaciga kao i materijala koji se inače koriste u konstrukcijama koje služe za apsorpciju energije udara,
- modelirati međuslojne načine popuštanja i popuštanje kompozitnih slojeva korištenjem dostupnih materijalnih modela i modela oštećivanja,
- validaciju numeričkih modela oštećivanja provesti korištenjem eksperimentalnih rezultata iz dostupne literature.

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

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

30. rujna 2021.


2. prosinca 2021.

13. – 17. prosinca 2021.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

  
Doc. dr. sc. Darko Ivančević

  
Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS OZNAKA .....	VII
SAŽETAK.....	X
SUMMARY .....	XI
1. UVOD .....	1
2. Motociklističke kacige .....	2
2.1. Tipovi kaciga .....	3
2.2. Komponente kacige .....	4
2.2.1. Vanjska ljuska .....	5
2.2.2. Apsorpcijski sloj.....	9
2.2.3. Ostale komponente kacige.....	12
3. Sigurnosni standardi za ispitivanje kaciga .....	14
4. Anatomija i biomehanika ljudske glave .....	19
4.1. Lubanja .....	19
4.2. Mozak i moždane ovojnice.....	20
4.3. Ozljede glave .....	22
5. Numerički model glave .....	25
5.1. Numerički model skalpa s licem.....	26
5.2. Numerički model lubanje .....	27
5.3. Numerički model <i>Dure Mater</i> .....	27
5.4. Numerički model subarahnoidnog prostora.....	28

5.5.	Numerički model mozga.....	28
6.	Numerički model kacige .....	30
6.1.	Numerički model preuzete vanjske ljuske.....	32
6.2.	Numerički model vanjske ljuske s kohezivnim elementima .....	35
6.2.1.	Heksaedarski kontinuirani ljuskasti elementi SC8R .....	37
6.2.2.	Kohezivni konačni element COH3D8.....	38
6.3.	Numerički model kompozitne ploče.....	39
6.4.	Numerički model apsorpcijskog sloja .....	42
6.4.1.	Crushable Foam.....	42
6.4.2.	Hyperfoam model i Mullins Effect .....	45
6.4.3.	Hashinov kriterij popuštanja .....	47
7.	Delaminacije kompozitnih materijala .....	49
7.1.	Modeliranje delaminacija u programskom paketu <i>Abaqus</i> .....	50
7.1.1.	Virtual Crack Closure Technique (VCCT) kriterij.....	51
8.	Rezultati.....	55
8.1.	Validacija modela oštećenja i modeliranja delaminacija.....	55
8.2.	Numerička analiza udarca kacige u krutu podlogu.....	56
8.3.	Numerička analiza delaminacija pomoću kohezivnih elemenata .....	69
9.	Zaključak.....	71
	LITERATURA.....	73

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Roth-ova i Lombard-ova kaciga [6].....	3
Slika 2. Primjer kacige a) zatvorenog tipa [8] b) otvorenog tipa [9].....	3
Slika 3. Primjeri kaciga a) modularnog tipa [9] b) za motocross [11].....	4
Slika 4. Komponente kacige [12].....	5
Slika 5. Raspored orijentacija slojeva kacige [17].....	7
Slika 6. Primjeri vlakana a) staklena vlakna [18] b) karbonska vlakna [19] c) kombinacija kevlar i ugljičnih vlakana [20].....	8
Slika 7. Apsorpcijski sloj a) od EPS-a [24] b) od EPP-a [25].....	10
Slika 8. Guljenje plutenih daski s drveta [6].....	11
Slika 9. Ergonomski sloj motociklističke kacige [28].....	12
Slika 10. Shema modela glave za standard ECE 22.05 [31].....	16
Slika 11. Standard ECE 22.05 - točke udara [31].....	17
Slika 12. Položaj kostiju lubanje [32].....	20
Slika 13. Dijelovi mozga/položaji režnjeva/presjek moždanih ovojnica [36].....	21
Slika 14. Linearni i depresivni prijelom lubanje [6].....	22
Slika 15. Ozljede mozga [6].....	23
Slika 16. Kontuzija mozga [37].....	24
Slika 17. Ispitni model [38].....	25
Slika 18. Mreža konačnih elemenata skalpa s licem.....	26
Slika 19. Numerički modeli a) lubanje b) dure mater c) subarahnoidnog prostora d) mozga .	29
Slika 20. Početni položaj numeričkog modela.....	31
Slika 21. Naznačeni dijelovi kacige [38].....	32
Slika 22. Položaj <i>zero-thickness</i> sloja.....	35
Slika 23. Razlika konvencionalnih i kontinuumskih ljuskastih konačnih elemenata [41].....	37
Slika 24. Shematski prikaz kohezivnog elementa [41].....	38
Slika 25. Model za ispitivanje udarnog opterećenja [42].....	39
Slika 26. Numerički model ploče s naznačenim područjima kohezivnog ponašanja.....	41



Slika 27. Položaj kohezivnih elemenata.....	41
Slika 28. Dijagram naprezanje deformacija EPS-a različite gustoće: a) 65 kg/m <sup>3</sup> b) 90kg/m <sup>3</sup> [43] .....	42
Slika 29. <i>Crushable Foam</i> model s volumnim očvršćenjem [1].....	43
Slika 30. Dijagram naprezanje ( $\sigma$ ) – deformacija ( $\epsilon$ ) za aglomerirani pluto [6].....	46
Slika 31. Oblici pojave delaminacija [47] .....	49
Slika 32. Energija deformiranja oslobođena prilikom širenja pukotine jednaka je radu potrebnom za zatvaranje pukotine [40] .....	51
Slika 33. Odcjepni način širenja pukotine [41] .....	52
Slika 34. QUADSCRT vrijednosti a) prvi zero-thickness i odgovarajući referentni sloj b) drugi zero-thickness i odgovarajući referentni sloj.....	56
Slika 35. Prikaz deformiranja numeričkog modela kacige s ugljičnim vlaknima i EPP-om kroz vrijeme. Numerički rezultat prikazuje raspodjelu ekvivalentne plastične deformacije [-] .....	57
Slika 36. Prikaz deformacije numeričkog modela kacige s ugljičnim vlaknima i plutom kroz vrijeme. Numerički rezultat prikazuje naprezanje prema von Misesu [MPa].....	58
Slika 37. Vrijednosti Hashinovog kriterija tlačnog popuštanja vlakana [-] u drugom i dvanaestom sloju kompozitne ljuske za $t = 0,003s$ a) epoksidne matrice s ugljičnim vlaknima (referentni model) b) epoksidne matrice sa staklenim vlaknima .....	59
Slika 38. Vrijednost Hashinovog kriterija tlačnog popuštanja matrice [-] za prvi, drugi i treći sloj za $t=0,003 s$ a) referentni model b) epoksidna matrica ojačana staklenim vlaknima.....	60
Slika 39. Vrijednost DAMAGEFC varijable [-] .....	61
Slika 40. Vrijednost DAMAGEMC varijable [-] .....	62
Slika 41. Ekvivalentno naprezanje prema Von Misesu [MPa] a) ljuska s ugljičnim vlaknima za $t= 0,0033 s$ b) ljuska sa staklenim vlaknima za $t= 0,0016 s$ .....	63
Slika 42. Vrijednosti tlaka mozga [MPa] kod modela s ugljičnim vlaknima za $t = 0,007 s$ a) model s EPP-om b) model s aglomeriranim plutom .....	64
Slika 43. Vrijednosti tlaka mozga [MPa] kod modela sa staklenim vlaknima a) model s EPP-om b) model s aglomeriranim plutom .....	65
Slika 44. Dijagram akceleracija s EPP-om kao materijalom apsorpcijskog sloja.....	65
Slika 45. Dijagram akceleracija s plutom kao materijalom apsorpcijskog sloja.....	66
Slika 46. Dijagram akceleracija s najvišim, najnižim i referentnim iznosima.....	67

---

Slika 47. Naprezanje prema von Misesu [MPa] a) prvi model b) drugi model c) treći model d) četvrti model e) referentni model .....	68
Slika 48. QUADSCRT vrijednosti [-] a) prvi model b) drugi model c) treći model d) četvrti model.....	70

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Pregled testova uvjetovanih standardom [6] .....	15
Tablica 2. Uvjeti udara i kriteriji loma za navedene standarde [6] .....	16
Tablica 3. Opće karakteristike ispitnih modela glave standarda ECE R22.05 [6] .....	17
Tablica 4. Kosti lubanje [33].....	19
Tablica 5. Pregled mreža konačnih elemenata .....	26
Tablica 6. Materijalna svojstva skalpa s licem [38] .....	26
Tablica 7. Materijalna svojstva modela lubanje [38] .....	27
Tablica 8. Materijalna svojstva modela Dure mater [38].....	27
Tablica 9. Materijalna svojstva modela subarahnoidnog prostora [1] .....	28
Tablica 10. Materijalna svojstva modela mozga [38] .....	28
Tablica 11. Kombinacije materijala korištene za simulacije.....	31
Tablica 12. Raspored slojeva vanjske ljuske [38] .....	33
Tablica 13. Svojstva epoksidne smole s ugljičnim vlaknima [38] .....	34
Tablica 14. Svojstva epoksidne smole sa staklenim vlaknima [39], [40] .....	34
Tablica 15. Mehanička svojstva kohezivnog ponašanja [42].....	36
Tablica 16. Materijalna svojstva ploče [42] .....	40
Tablica 17. Vrijednosti parametara za EPP [44][45] .....	45
Tablica 18. Vrijednosti parametara korištenih za <i>Mullins Effect</i> model [6] .....	46

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$a$	mm/s <sup>2</sup>	Rezultantno ubrzanje glave
$b$	mm	Širina pukotine
$C_{01}$	MPa	Materijalna konstanta <i>Mooney-Rivlin</i> materijalnog modela
$C_{10}$	MPa	Materijalna konstanta <i>Mooney-Rivlin</i> materijalnog modela
$d$	mm	Duljina pukotine
$d_f$	-	Varijabla oštećenja vlakana
$d_m$	-	Varijabla oštećenja matrice
$d_s$	-	Varijabla smičnog oštećenja
$D_1$	MPa <sup>-1</sup>	Materijalna konstanta <i>Mooney-Rivlin</i> materijalnog modela
$E$	MPa	Yongov modul izotropnog materijala
$E_1$	MPa	Modul elastičnosti u smjeru vlakana
$E_2$	MPa	modul elastičnosti okomit na smjer vlakana
$F_f^c$	MPa	Popuštanje vlakana pri tlačnom opterećenju
$F_f^t$	MPa	Popuštanje vlakana pri vlačnom opterećenju
$F_m^c$	MPa	Popuštanje matrice pri tlačnom opterećenju
$F_m^t$	MPa	Popuštanje matrice pri vlačnom opterećenju
$F_{v,ij}$	MPa	Vertikalna sila između čvorova $i$ i $j$
$G_{equiv}$	J/m <sup>2</sup>	Ekvivalentna brzina oslobađanja energije
$G_{equivC}$	J/m <sup>2</sup>	Ekvivalentna kritična brzina oslobađanja energije
$\bar{g}_i^P$	-	Smični modul opuštanja
$G_i$	J/m <sup>2</sup>	Brzina oslobađanja energije
$G_{ij}$	MPa	modul smicanja u ravnini $i, j$
$G_{iC}$	J/m <sup>2</sup>	Kritična brzina oslobađanja energije
$G_{IC}$	J/m <sup>2</sup>	Kritična vrijednost energije loma za prvi način loma
$G_{IIC}$	J/m <sup>2</sup>	Kritična vrijednost energije loma za drugi način loma
$G_{IIIC}$	J/m <sup>2</sup>	Kritična vrijednost energije loma za treći način loma
$G_{1T}$	J/m <sup>2</sup>	Vlačna energija loma u smjeru vlakana
$G_{1C}$	J/m <sup>2</sup>	Tlačna energija loma u smjeru vlakana
$G_{2T}$	J/m <sup>2</sup>	Vlačna energija loma u smjeru okomitom na smjer vlakana

$G_{2c}$	J/m <sup>2</sup>	Tlačna energija loma u smjeru okomitom na smjer vlakana
$J$	-	Omjer elastičnih volumena
$k$	-	Omjer kompresijskih granica tečenja
$\bar{k}_i^P$	-	Volumni modul opuštanja
$k_t$	-	Omjer hidrostatskih granica tečenja
$K$	N/m <sup>3</sup>	<i>Penalty</i> krutost
$m$	kg	masa
$\mathbf{M}$	-	Matrica oštećenja
$p$	MPa	tlak
$p_c$	MPa	Granica tečenja pri hidrostatskoj kompresiji
$p_o$	-	Središte površine elipse
$p_c^O$	MPa	Inicijalna granica tečenja hidrostatske kompresije
$p_t$	MPa	Čvrstoća materijala kod hidrostatskog vlačnog naprezanja
$q$	MPa	Ekvivalentno naprezanje prema von Misesu
$r$	-	Materijalni parametar
$\mathbf{S}$	MPa	Devijatorsko naprezanje
$S$	MPa	Smična čvrstoća sloja
$t_i$	s	Točka impulsa ubrzanja
$U$	-	funkcija gustoće energije deformacije
$v_{i,j}$	mm	Vertikalni pomak između čvorova $i$ i $j$
$X^C$	MPa	Tlačna čvrstoća u smjeru vlakana
$X^T$	MPa	Vlačna čvrstoća u smjeru vlakana
$Y^C$	MPa	Tlačna čvrstoća u smjeru okomitom na smjer vlakana
$Y^T$	MPa	Vlačna čvrstoća u smjeru okomitom na smjer vlakana
$\alpha$	-	Oblikovni faktor
$\beta$	-	Materijalni parametar
$\varepsilon$	mm/mm	deformacija
$\varepsilon_i$	mm/mm	Nominalne deformacije
$\eta$	-	Varijabla oštećenja (B-K kriterij)
$\lambda_i$	MPa	Glavna istežanja
$\mu_i$	MPa	Koeficijent koji definira modul smičnosti
$\nu$	-	Poissonov koeficijent
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Gustoća

---

$\sigma$	MPa	Naprezanje
$\hat{\sigma}$	MPa	Efektivni tenzor naprezanja
$\sigma_C^0$	MPa	Inicijalna granica tečenja jednoosne kompresije
$\tau_i$	s	Vrijeme opuštanja
$\tau_{IIIc}$	MPa	Međuslojna smična čvrstoća
$\tau_{IIIC}$	MPa	Međuslojna smična čvrstoća

## SAŽETAK

U ovome radu provedena je analiza udarnih opterećenja motociklističke kacige pomoću metode konačnih elemenata u programskom paketu *Abaqus/Explicit*.

U prvom poglavlju opisane su neke opće karakteristike koje se vežu za motociklističke kacige. U drugom poglavlju navedena je ukratko povijest kaciga, kakvi tipovi kaciga postoje na tržištu, navedene su glavne komponente svake motociklističke kacige te su navedeni neki od materijala za izradu. Trećim poglavljem opisani su sigurnosni standardi za ispitivanje kaciga, opisana su ispitivanja koja standardi zahtijevaju te su prikazane usporedbe četiri najčešća standarda. Četvrtim poglavljem opisana je anatomija glave, navedene su glavne karakteristike i dijelovi lubanje i mozga te su prikazane neke od vrsta ozljeda prouzrokovanih udarnim opterećenjem. Peto i šesto poglavlje sadrži numerički model glave i same kacige. Navedene su sve korištene karakteristike, materijali te parametri za provedbu simulacija. U sedmom poglavlju dan je kraći opis međuslojnih oštećenja, odnosno delaminacija uz detaljnije objašnjen Virtual Crack Closure Technique (VCCT) kriterij. Osmim poglavljem prikazani su svi dobiveni rezultati provedenih simulacija te osvrta na iste, te posljednjim devetim poglavljem donesen je zaključak temeljen na dobivenim i prikazanim rezultatima.

Ključne riječi: motociklistička kaciga, numeričko modeliranje udara, kohezivna zona, kohezivni elementi, delaminacija, kriteriji popuštanja.

## **SUMMARY**

The subject of this thesis is to perform a stress analysis of a motorcycle helmet under impact load using the finite element analysis offered in a software Abaqus/Explicit.

Chapter one describes general characteristics of a typical motorcycle helmet. Chapter two describes the history of helmets, the types of helmets available on market today and about main components and materials used to produce them. Safety standards for tests, tests themselves and standard comparisons are all shown in chapter three. Chapter four deals with the anatomy of a human head, specifically those of a skull and a brain and it also explains some of the more common injuries caused by impact load. Chapters five and six describe numerical models of a head and a helmet. All the characteristics, materials and parameters required for simulations are listed as well. Chapter seven provides a brief description of delamination, with a detailed description of the VCCT criterion. Chapter eight shows all the results acquired via simulations and explanations thereof. Chapter nine is essentially a conclusion based on aforementioned results.

Key words: motorcycle helmet, numerical modelling of damage, cohesive zone model, cohesive elements, delamination, failure criterion.



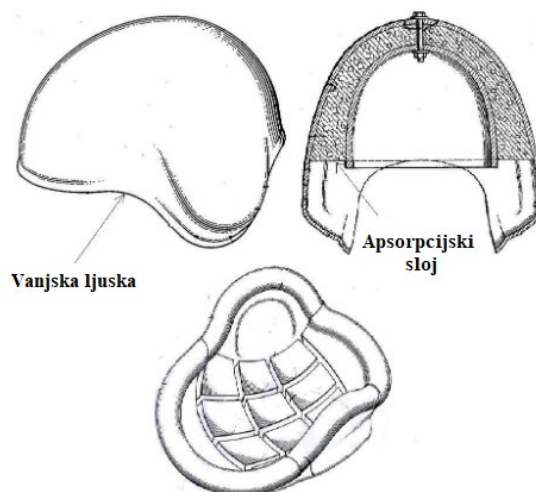
## 1. UVOD

Kacige su jedna od najvažnijih vrsta osobne sigurnosne opreme. Udarac u glavu može prouzročiti iznimne povrede koje mogu biti i smrtonosne, stoga je zaštita glave od neizmjerne visoke važnosti. Štoviše, prometne nesreće glavni su uzrok povreda glave, a u njima prednjače motociklisti. Kacige svoju namjenu nalaze u različitim domenama, primjerice, vojne i hitne službe, kod fizičkih radnika, u sportu i drugim rekreacijskim aktivnostima. Svaka od navedenih grana zahtijeva i različite tehničke zahtjeve, a glavne se razlike očituju u materijalu, geometriji i konfiguraciji vanjskih ljusaka. Kod materijala koji apsorbiraju energiju, zahtjevi su vrlo striktni, potrebno je koristiti materijale koji dobro apsorbiraju energiju i ravnomjerno ju raspodjeljuju po presjeku. U realnosti su kacige često izložene opterećenju s više udara, što kod motociklista znači da postoji značajan rizik za više udara glavom, primjerice ukoliko dođe do udara glave s automobilom, vjerojatno će doći i do udara glave s tlom. Kako bi se poboljšala sigurnosti, udobnost, estetika te sveukupna kvaliteta kaciga, u sve većoj mjeri predlažu se novi materijali za izradu, s naglaskom razvijanja novih koncepata za poboljšanje svojstava apsorpcije energije udara. Kod izrade apsorpcijskog sloja materijal koji se najčešće koristi je ekspanzirana polistirenska pjena (EPS) zbog dobrih svojstava apsorpiranja energije, s relativno malom masom te niskim troškovima proizvodnje te ekspanzirana polipropilenska pjena (EPP) zbog navedenih razloga [1]. Kod izrade vanjske ljuske koriste se dvije osnovne vrste polimernih materijala, a to su termoplastika i termoreaktivna smola. Osnovna razlika vidljiva je u tome što termoplastika ne zahtijeva korištenje sredstva za stvrdnjavanje što ju čini reciklabilnom, dok termoreaktivna smola zahtijeva. S obzirom na podizanje svijesnosti o štetnosti određenih materijala za okoliš te trenda smanjenja proizvodnje plastike, kod izrade komponenti kaciga kacige koriste se materijali koji su deklarirani kao ekološki prihvatljiviji. Iz tog razloga, se sve više mogu naći kacige s kompozitnom vanjskom ljuskom, a provodi se velik broj istraživanja pluta kao materijala izrade apsorpcijskog sloja, s ciljem zamijene EPS-a i EPP-a. Kacige s plastičnim vanjskim ljuskama pružaju dobru krutost i fleksibilnost, ali u odnosu na kompozitne vanjske ljuske imaju znatno nižu čvrstoću. Glavna prednost kaciga s plastičnim vanjskim ljuskama nad kompozitnim ljuskama je cijena izrade što rezultira i nižom konačnom cijenom [2]. U ovom radu provedene su simulacije udara numeričkog modela glave s kacigom, varirajući materijale vanjskih ljuski te apsorpcijskog sloja kacige te je promatrano kohezivno ponašanje spoja vanjske ljuske i apsorpcijskog sloja pomoću kohezivnih elemenata.

## 2. Motociklističke kacige

Zaštitne kacige prvi se puta pojavljuju prije, procjenjuje se, šest tisućljeća. Osnovna funkcija bila im je zaštita glava ratnika, a izrađene su od raznih vrsta materijala. Prve kacige s ojačanjima pronađene su na području južne Mezopotamije, na prebivalištu Sumerana, a procjenjuje se da su izrađene 2300. godine prije Krista. Pretpostavka je da se prva metalna kaciga pojavljuje se 1700. godine prije Krista u grčkoj Mikenji, a izrađena je od bronce. Zaštitne kacige su se u Staroj Grčkoj te Rimskom Carstvu koristile u velikom broju jer su omogućavale obranu vojnicima od napada oštricama, kamenjima te raznim tupim predmetima. U periodu između 1700. godine i Prvog svjetskog rata, vojske širom svijeta nisu prakticirale nošenje zaštitnih kaciga, što se kroz Prvi i Drugi svjetski rat znatno mijenja. Nakon Drugog svjetskog rata, za izradu kaciga počeli su se koristiti kevlar i aramidna vlakna zbog dobrih apsorpcijskih svojstava što je uvelike pomogalo vojnicima kod udara metaka [3]. Australijski neurokirurg Hugh Cairns započeo je istraživanje i provođenje kampanje za obavezno nošenje zaštitne motociklističke kacige u Velikoj Britaniji potaknut smrću T.E. Lawrencea koji je za vrijeme Prvog svjetskog rata poginuo u motociklističkoj nesreći. Motociklističke kacige izumljene su 1914., ali tada se koristile samo za vrijeme utrka. Cairns početkom Drugog svjetskog rata piše izvješće koje se zvalo „Ozljede glave kod motociklista” (*Head injuries in motor-cyclists* [4]). U radu je pokazao kako je 2279 motociklista poginulo u nesrećama u 21 mjesec rata, dok njih sedmero koji su nosili kacige prilikom pada nisu zadobili smrtonosne ozljede. Obaveza nošenja zaštitnih kaciga kod vojnika uvodi se 1941., a tek 1973. postaje obavezno nošenje motociklističke kacige za sve motocikliste u Velikoj Britaniji [5].

Pedesetih godina 20. stoljeća, kako bi se smanjilo opterećenje na glavu prilikom udarca, u izradi kaciga počinju se postavljati slojevi ispod vanjske ljuske koji apsorbiraju i ravnomjernije raspodjeljuju energiju. U toj fazi vanjske ljuske kaciga za motocikliste nisu bile izrađene od metala, već od primjerice lana impregniranog lakom. Holbourn je 1943. proveo istraživanja kojima je dokazao kako su ozljede nastale uslijed prometnih nesreća posljedica kratkotrajnih ubrzanja koje djeluju na glavu. Deset godina kasnije Turner i Havey predstavljaju moderne kacige koje su se sastojale od elastične gume i metalne ljuske, ali kao glavni problem nametnula se masa te kacige. Iste godine, Roth i Lombard predstavili su kacigu kakva se i danas koristi [6]. Na slici 1. prikazana je shema njihove kacige.



Slika 1. Roth-ova i Lombard-ova kaciga [6]

## 2.1. Tipovi kaciga

Najvažniji dio zaštitne opreme, ali nažalost i često zanemaren je kaciga. Ovisno o potrebi, stilu i preferencija postoji nekoliko tipova kaciga. Najpoznatiji i najčešće korišten kod motociklista je zatvoreni tip kaciga. Zatvorena kaciga pruža maksimalnu zaštitu jer pokriva čitavo lice, glavu i vrat, pritom pružajući dodatnu zaštitu za bradu u slučaju udarca. Pomični vizir omogućuje pristup licu. Glavni nedostatak, u usporedbi s ostalim navedenim tipovima kaciga, je veća masa koja stvara dodatno opterećenje i na vrat.

Drugi tip su otvorene kacige, poznate još i pod nazivom  $3/4$  kacige. Kao što im samo ime kaže, kaciga prekriva sve dijelove glave, ali na području lica su otvorene. Otvorene kacige koriste osobe koje žele značajnije osjetiti brzinu, ali samim time, ukoliko dođe do udara, zaštita je značajno smanjena s obzirom na nedostatak zaštite za bradu [7]. Primjeri zatvorenog i otvorenog tipa kacige prikazani su slikom 2.

a)



b)

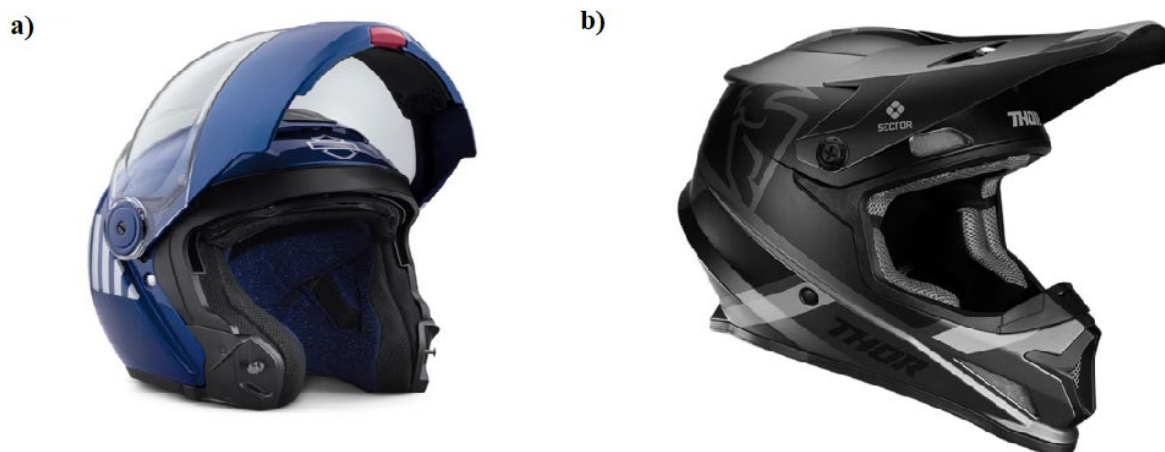


Slika 2. Primjer kacige a) zatvorenog tipa [8] b) otvorenog tipa [9]

Treći tip su modularne kacige poznate i kao *flip-up* kacige. Modularne kacige nastale su kao kombinacija zatvorenog i otvorenog tipa kacige, a naziv *flip-up* dolazi iz razloga što se štitnik za bradu, zajedno s vizikom, po potrebi može podići i spustiti. Glavna im je prednost jednostavnost skidanja i stavljanja, ali imaju manju razinu zaštite u odnosu na zatvoreni tip.

Četvrta vrsta u *motocross* kacige koje imaju veći vizir i znatno prošireni štitnik za bradu. Konstruirane su tako da pružaju maksimalnu moguću zaštitu uz što manju masu.

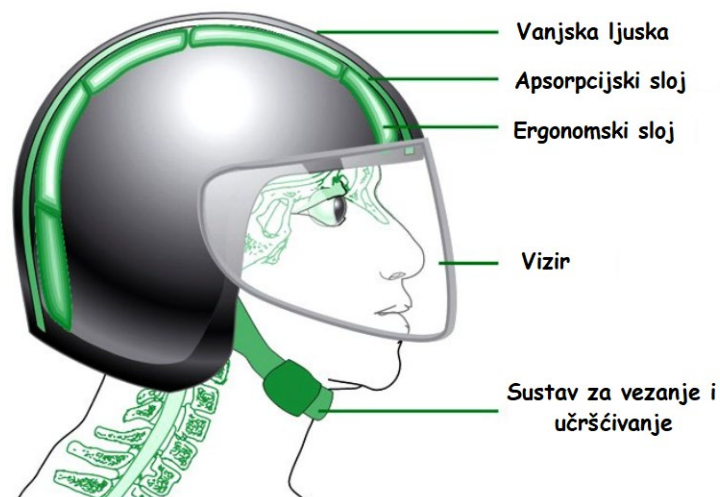
Pod petu vrstu spadaju sportske kacige. To su kacige koje se koriste u raznim kontaktnim sportovima, primjerice američki nogomet i borilački sportovi, bejzbol kacige, kacige za brdski biciklizam i slično [7]. Primjeri modularne i kacige za *motocross* prikazani su slikom 3.



Slika 3. Primjeri kaciga a) modularnog tipa [9] b) za motocross [11]

## 2.2. Komponente kacige

Danas, sve kacige izrađene su od više komponenti, a svaka od komponenti od više slojeva gdje svaki od tih ima određenu zadaću. Glavne komponente kacige su: vanjska ljuska, apsorpcijski sloj koji apsorbira energiju udarca te ju ravnomjerno raspodjeljuje po površini, ergonomski sloj koji služi kako bi sama kaciga bolje prianjala, uz to upija i vlagu, vizir i sustav za vezanje i učvršćivanje [12]. Glavne komponente kacige naznačene su na slici 4.



Slika 4. Komponente kacige [12]

Vanjska ljuska konstruirana je tako da prilikom udarca, razlaže energiju udarca po svojoj površini. Nakon što udar pređe preko vanjske ljuske kacige, apsorpcijski sloj će se na mjestu najveće koncentracije naprezanja znatno deformirati u svrhu same apsorpcije udarne energije kako bi došlo do minimalnih mogućih povreda glave [12].

### 2.2.1. Vanjska ljuska

Generalno govoreći, uloge vanjske ljuske su [13]:

- raspršivanje udarne energije na širu površinu u svrhu smanjenja koncentracije naprezanja,
- sprječavanje prodora šiljastim i oštrim predmetima koji bi mogli probosti lubanju,
- zaštita apsorpcijskog sloja od abrazivnog oštećenja do kojeg dolazi u kontaktu s kolnikom i drugim površinama udara,
- apsorpiranje početnog udara (do 30 %).

Materijali za izradu vanjske ljuske dijele se u dvije osnovne skupine: termoplastike i kompozitni materijali.

#### 2.2.1.1. Vanjske ljsuske od termoplastike

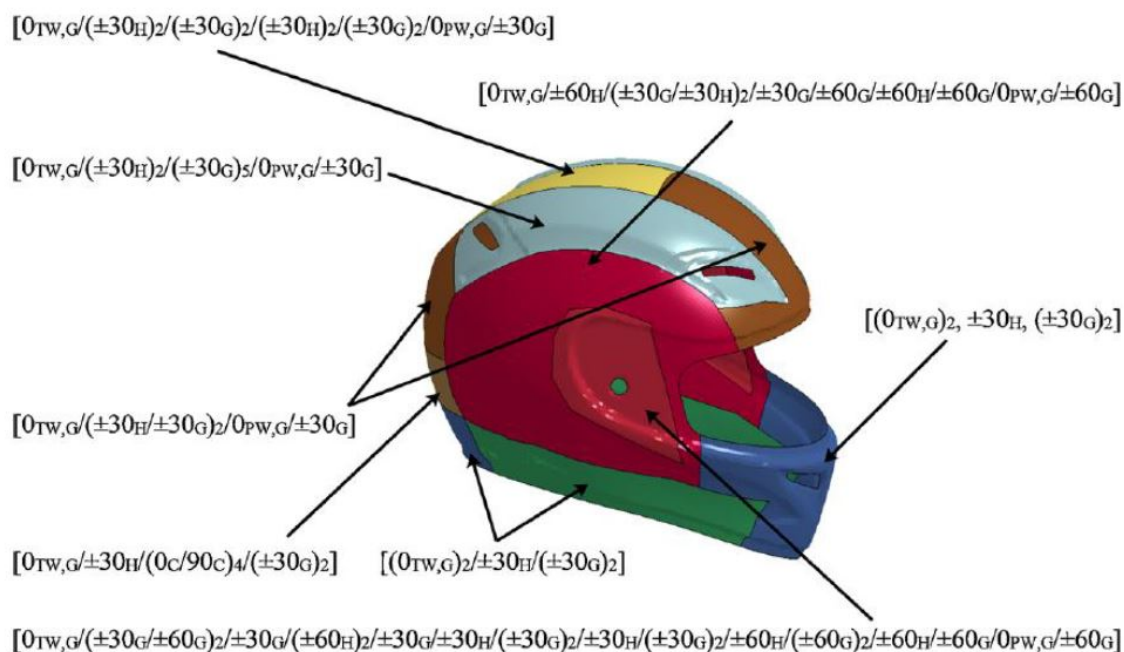
Najpoznatiji i najčešće korišteni materijal iz ove kategorije za izradu vanjskih ljsuski je akrilonitril butadien stiren (ABS). ABS je neprozirni termoplastični polimer koji se dobiva polimerizacijom stirena i akrilonitrila u prisutstvu polibutadiena. Glavna karakteristika termoplastika je da prilikom zagrijavanja ne gore, već se tope, što omogućava jednostavno oblikovanje injekcijskim prešanjem. Uspoređujući s drugim polimerima, ABS pokazuje znatno bolja mehanička svojstva, kao što su otpornost na udarce, žilavost i krutost. Mehanička svojstva stabilna su pri rasponu temperature od -20 do 80°C, što je kod izrade vanjskih ljsuski kaciaga bitno da ne dolazi do smanjenja otpornosti na udar pri smanjenju temperature okoliša. Na konačna svojstva u određenoj mjeri utječe i način prerade materijala do konačnog proizvoda. Na primjer, prešanjem pri visokim temperaturama poboljšava se sjaj i otpornost na toplinu, dok se najveća otpornost na udarce i vrijednost čvrstoće postiže prešanjem pri niskim temperaturama [14].

Uz ABS, za izradu vanjskih ljsuski kaciaga koristi se i polikarbonat. Polikarbonat je termoplastika izrađena od sintetičke smole koja u svom sastavu sadrži karbonatne skupine. Sam po sebi, polikarbonat je prozirna plastika koja je glavni materijal za izradu vizira za kaciaga, leća, staklenika, medicinske optike, neprobojnih prozora i mnogih drugih stvari. Tvrtka *General Electric* patentirala je njihovu polikarbonatnu formulu koju su predstavili pod imenom Lexan čija se uporaba očituje i u proizvodnji vanjskih ljsuski kaciaga. Lexan, u usporedbi s ABS-om, nudi veću otpornost na udar, ali i veću masu same kaciaga [12].

#### 2.2.1.2. Kompozitne vanjske ljsuske

Kompozitne ljsuske sastoje se od različitih mješavina materijala vlakana i epoksidne smole. Obično se radi o staklenim i ugljičnim vlaknima, ali u proizvodnji se koriste i drugi kompozitni materijali, primjerice kevlar. Uobičajeno, kompozitne ljsuske proizvode se tako da se početno postavi prvi sloj materijala u prethodno premazani kalup, zatim se ulijeva epoksidna smola ili neko drugo punilo koje se koristi za vezivanje svih slojeva i formiranje vanjske ljsuske kaciaga. Cijela smjesa se zagrijava kako bi se punilo stegnulo te se prelazi na postavljanje idućeg sloja [15]. Različiti faktori direktno utječu na svojstva kompozitnog materijala: svojstva i udio konstituenata (obično je udio vlakana otprilike 60-70%), raspored i orijentacija slojeva te same dimenzije. Orijehtacijom slojeva kompozitni materijal direktno se prilagođava određenom zahtjevu za primjenu. Optimalnu orijentaciju slojeva moguće je odrediti numeričkim ili

eksperimentalnim putem. Ukoliko se koristi numerička metoda, tada je potrebno provesti veći broj analiza i usporediti rezultate kako bi se pokazao najpovoljniji raspored orijentacija. Isto tako, nije nužno da cijela vanjska ljuska kacige sadrži isti raspored orijentacija, već se isti prilagođava zahtjevima koje kaciga mora ispuniti, a oni su definirani standardima koji će kasnije biti spomenuti [16]. Shematski prikaz kacige s različitim rasporedom orijentacija slojeva prikazan je slikom 5.



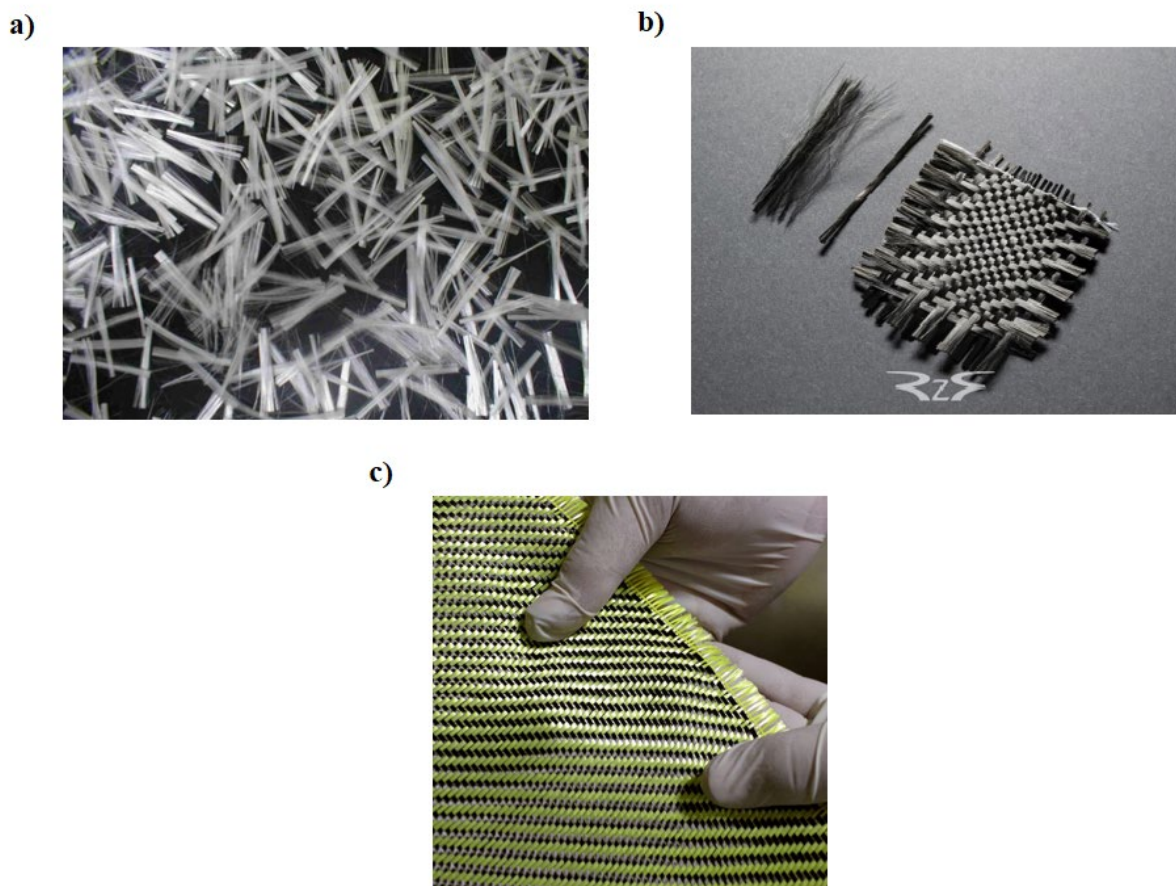
Slika 5. Raspored orijentacija slojeva kacige [17]

Ljuske sa staklenim vlaknima samo su jedna od vrsta mogućih kompozitnih kaciga. Kao što im i samo ime govori, u proizvodnji se koriste staklena vlakna vezana epoksidnom smolom. Neki modeli mogu sadržavati kevlar ili karbonska vlakna u mješavini, ali prvenstveno se koriste staklena. Glavne prednosti ljuski sa staklenim vlaknima su velika fleksibilnost i pristupačna cijena. Dovoljno je jaka da izdrži jako udarno opterećenje, ali i dovoljno fleksibilna kako bi energiju udara ravnomjerno raspodijelila po svojoj površini.

Ljuske s karbonskim vlaknima sadrže ugljik kao primarni element. Struktura ugljika sadrži kristale koji imaju izrazito visoku čvrstoću. Uz svojstvo visoke čvrstoće, ugljična su vlakna vrlo lagana pa karbonske ljuske mogu izdržati jake udare, a da pritom imaju malu masu. U usporedbi sa staklenim vlaknima, mogu izdržati veće vrijednosti udarnog opterećenja, ali cjenovno su skuplji, što znatnije dolazi do izražaja ukoliko su miješana s kevlar vlaknima.

Kada se govori o bilo kojem obliku zaštite, kevlar je jedan od najsnažnijih materijala na tržištu. Kevlar je zapravo zaštićeni naziv za materijal koji je razvila kompanija *DuPont*, a građen je od sintetičkih poliamidnih vlakana. Zbog svojih paralelno pozicioniranih molekula, kevlar ima iznimno visoku vlačnu čvrstoću, što omogućuje proizvodnju kaciga male gustoće, a to direktno rezultira i manjom masom. Međutim, kevlar ima nižu vrijednost tlačne čvrstoće u odnosu na karbonska vlakna, stoga se ova dva materijala često miješaju prilikom izrade.

Kacige od sintetički ojačanih ljuski, poznate i kao SRS kacige, kombiniraju prethodno navedene materijale prilikom izrade. Njihov primarni materijal je termoplastična smola koja se pri zagrijavanju stvrdnjava i povezuje različita vlakna u jednu cjelinu. Uz navedene vrste kompozitnih vlakana, mogu sadržavati i neke organske materijale. Glavna prednost im je ta što zbog termoplastične smole pružaju istu razinu izdržljivosti i čvrstoće s manje slojeva vlakana. To ih čini lakšima i fleksibilnijima od standardnih kaciga s epoksidnom smolom [15]. Na slici 6. prikazani su primjeri staklenih, karbonskih te kombinacija kevlar i ugljičnih vlakana.



**Slika 6. Primjeri vlakana a) staklena vlakna [18] b) karbonska vlakna [19] c) kombinacija kevlar i ugljičnih vlakana [20]**



### 2.2.2. *Apsorpcijski sloj*

Druga, izrazito bitna komponenta kacige je apsorpcijski sloj. Glavna uloga sloja je apsorpiranje što veće količine energije udara, koju je djelomično apsorpirala i razložila po površini vanjska ljuska. Sloj prilikom deformiranja apsorpira energiju udara i time snižava opterećenje koje se prenosi na glavu. Kod izrade apsorpcijskih slojeva koriste se materijali s izraženo visokim svojstvima apsorpcije energije kako bi se maksimalno smanjilo inercijsko opterećenje na glavu te smanjila vjerojatnost od značajnih povreda glave, mozga i vrata. Najčešći oblik ozljeda prilikom udarca su ozljede mozga i moždanog tkiva bez vidljivih prijeloma lubanje i lica. Nastaju zbog relativnog pomicanja mozga unutar lubanje. Razlog tome je u konzistenciji mozga i likvora (tekućine koja okružuje mozak), odnosno mogućnošću pomicanja mozga u odnosu na lubanju. Drugim riječima, kada dođe do udara, a kapacitet apsorpcijskog sloja nije dovoljan za količinu dovedene energije, lubanja se u trenutku udara zaustavlja, ali mozak se zbog inercije nastavlja kretati. Zbog takvih sudara koji uzrokuju relativne kretnje mozga, dolazi do smicanja moždanog tkiva koje za posljedicu vuče unutarnja krvarenja i teške ozljede mozga [6].

Na temelju dosadašnjih iskustava primjene, čimbenici koji utječu na učinak apsorpcije energije sloja su izbor materijala, struktura, debljina te gustoća apsorpcijskog sloja. Najčešće korišteni materijal za izradu apsorpcijskih slojeva je ekspanzirani polistiren (EPS), a na tržištu se mogu pronaći slojevi izrađeni od ekspaniranog polipropilena (EPP), ekspaniranog poliuretana (EPU) i sličnih pjena koje posjeduju dobra apsorpcijska svojstva.

Kako bi se jednostavnije prilagodio udarnim opterećenjima, EPS se izrađuje u slojevima različitih gustoća dopuštajući mekšim slojevima da se zgnječe pri manjim udarima, a tvrdim da preuzmu jače udare [21]. Izrazito je lagan, postojan na širokom spektru temperatura i pri različitim okolišnim i vremenskim uvjetima. Još jedna od prednosti je ta što u dodiru s nekim od uobičajenih kemikalija ne dolazi do oštećenja i ima dugačak vijek trajanja u kojem zadržava svoje karakteristike. Za izradu apsorpcijskog sloja koristi se EPS visoke kvalitete i proizvodi se tako da se male kuglice polistirena, promjera 0,5-1,5 mm, stavljaju u kalup te uz pomoć pare i pentana šire i do 40 puta u odnosu na početne dimenzije, spajajući se u čvrstu masu koja poprima oblik kalupa. Međutim, nakon što se EPS izloži udaru, nema sposobnost vraćanja u svoj prvobitan oblik, stoga je prilagođen za primjenu kod jednostrukih udara te je sam apsorpcijski sloj nakon deformacije potrebno zamijeniti [22].

Ekspandirana polipropilenska pjena (EPP) izgledom je gotovo identična EPS-u. EPP je višenamjenska pjena koja, za razliku od EPS-a, kroz vrijeme ima mogućnost povrata svog prvobitnog oblika nakon sudara i zadržava većinu svojih apsorpcijskih karakteristika. Tehnologija izrade malo je kompliciranija od tehnologije izrade EPS-a, što rezultira i većim troškovima proizvodnje. U usporedbi s apsorpcijskim slojem izrađenim od EPS-a, sloj izrađen od EPP-a je deblji i obično teži, što u konačnici rezultira i većom masom mase kacige. Uz motociklističke kacige, EPP se koristi i u proizvodnji *skateboard* kaciga, zbog svojstva povrata oblika u prvobitan oblik. 2004.godine tvrtka *Pro Tec* predstavila je modificirani EPP kojeg su nazvali SXP. SXP ispunjava sve uvjete uvjetovane normom koje materijal mora zadovoljiti bez povećanja mase samog sloja [23]. Na slici 7. prikazani su apsorpcijski slojevi od EPS-a i EPP-a.

a)



b)



Slika 7. Apsorpcijski sloj a) od EPS-a [24] b) od EPP-a [25]

Kao što je već navedeno, većina apsorpcijskih slojeva izrađena je od sintetičkih materijala kombinirajući različite gustoće, apsorbirajući udarnu energiju kroz trajno ili gotovo trajno deformiranje materijala. Međutim, povećavajući svijest i odgovornost prema okolišu, otnedavno pokrenuti trend promicanja potrage za takozvanim „zelenim“ materijalima potiče proizvođače da koriste materijale s dobrim mehaničkim svojstvima vezanih za recikliranje i održavanje. Zbog velikog problema plastičnog otpada na bazi nafte, potraga za alternativnim materijalima nikada nije bila veća. Jedno od rješenja predstavlja korištenje pluta za materijal apsorpcijskog sloja. Pluta je prirodni materijal koji ima sposobnost apsorbirati velike količine energije udara, što ga čini idealnom zamjenom za sintetičke materijale. Konkretno, aglomerirani pluta, nusprodukt dobiven od ostataka proizvodnje čepova za vino, pokazao se

prilično obećavajućim pokazujući gotovo izotropno mehaničko ponašanje, dobru otpornost na udare i sposobnost zadržavanja postojanosti mehaničkih svojstava pri ekstremnim temperaturama. Osim toga, pluto se zbog svog viskoelastičnog ponašanja gotovo u potpunosti oporavlja nakon deformacije, odnosno vraća se u svoj prvobitan oblik, što je poželjna karakteristika materijala i samim time bi se riješila potreba zamjene apsorpcijskog sloja nakon udara [1]. Pluto ima i dobra izolacijska svojstva, vrlo nisku propusnost za fluide, kemijsku stabilnost te dug vijek trajanja. U usporedbi sa sintetičkim materijalima, pluto se pokazuje kao održiva alternativa iz razloga što je u potpunosti reciklabilan i ne oštećuje stabla jer stablo obnavlja svoju koru svakih devet godina. Zbog navedenih karakteristika i prednosti u odnosu na dosadašnje sintetičke materijale, istražuju se razna svojstva pluta, primjerice utjecaj gustoće pluta na mehaničko ponašanje pod kompresijom te brzina i način povratka u prvobitan položaj nakon izloženosti višestrukim udarima [26]. Na slici 8. prikazano je skidanje plutenih dasaka s drveta.



**Slika 8. Guljenje plutenih daski s drveta [6]**

Aglomerirani pluto rezultat je aglomeracije granula pluta u rasponu od 0,5 do 20 mm s drugim materijalima, primjerice fenolne i melaminske termoreaktivne smole, smole na bazi povrća i sl. Granule pluta se, nakon mljevenja, čiste i suše prisilnom cirkulacijom vrućeg zraka dajući granulatu potreban sadržaj vlage. Aglomerat nastaje aglutinacijom granula određene veličine i gustoće pomoću tlaka, topline i veziva, ovisno o proizvodu i zahtjevima primjene. Vezivo ima važnu ulogu u mehaničkim svojstvima konačnog proizvoda, a izbor ovisi o primjeni. Dakle, aglomerirani pluto izotropni je materijal koji se može proizvoditi u raznim oblicima i veličinama, zadržavajući sve prednosti korištenja prirodnog pluta [6].

### 2.2.3. Ostale komponente kacige

Ergonomski sloj (slika 9.) motociklističke kacige važna je komponenta koja kontrolira čimbenike udobnosti tijekom nošenja kacige te osigurava dobro prianjanje i stabilnost kacige na glavi. Unutarnja obloga sastoji se od jastučića izrađenih od fleksibilnog poliuretanskog sloja niske gustoće. Jastučići su pričvršćeni na sloj meke tkanine koja je u izravnom kontaktu s glavom. Sloj poliuretanske pjene ne može se postaviti u sve kacige, već njegova debljina i gustoća variraju ovisno o tipu kacige. Jastučići imaju sposobnost brzog apsorbaranja znoja te zrak jednostavno može cirkulirati. Tkanina, koja se najčešće izrađuje od pamuka, kemijski se obrađuje kako bi sadržavala antibakterijska svojstva, a jastučići su perivi i lako se mogu mijenjati. Još jedna od zadaća ergonomskog sloja je sprječavanje bilo kakvih vibracija čak i prilikom vožnje pri velikim brzinama, u suprotnom bi se vršio dodatni pritisak na glavu što često rezultira glavoboljama, a samim time i smanjenjem koncentracije [27].



Slika 9. Ergonomski sloj motociklističke kacige [28]

Vizir pruža zaštitu lica i zaštitu od sunčevih zraka koje mogu znatno smanjiti vidljivost i preglednost u vožnji. Generalno su konstruirani za zatvoreni tip kacige jer pružaju zaštitu od vrha kacige sve do brade. Također i kod otvorenog tipa kacige vizir može sezati do brade, ali češća izvedba je samo polovične duljine, odnosno pružanje zaštite za oči. Viziri posjeduju mehanizam koji omogućuje kretanje i pričvršćivanje i lako se mijenjaju kako bi se omogućilo korisniku kacige da ga izabere po svojim preferencijama. Iako postoje u raznim bojama, većina proizvođača ne preporuča korištenje zatamnenih vizira jer oni također mogu smanjiti vidljivost, osobito u sumrak i u oblačnim danima, a prilikom noćne vožnje su zabranjeni [29].

Dva su osnovna materijala koja se koriste za izradu vizira, a to su akril i polikarbonat. Akril se koristi kod izrade jeftinijih kaciga, ne iz razloga što je lošiji materijal, nego zato što je vrlo podložan ogrebotinama i tijekom vremena akrilni viziri mogu postati žućkasti ili zamućeni te ga je potrebno češće mijenjati. Polikarbonatni viziri su čvršći što ih čini otpornijima na ogrebotine u odnosu na akrilne i optički su bolji u smislu da ne dolazi do nikakvog izobličenja. Čišćenje vizira je poprilično jednostavno, a s unutarnje strane premazani su slojem koji sprječava magljenje.

Sve kacige, tako i motociklističke moraju imati sustav za vezanje. Osim što služi kako bi se sama kaciga pričvrstila na glavu, vrlo bitnu ulogu pokazuje prilikom sudara jer zadržava glavu unutar kacige. S obzirom da se prilikom sudara javljaju velike sile, standardi i testiranja kaciga sadrže zaseban skup testova za testiranje izdržljivosti i čvrstoće sustava za vezanje. Gotovo bez iznimke imaju oblik dviju traka koje se povezuju u školjci. Jeftinije kacige imaju tendenciju korištenja mehanizama koji omogućuju brzo otpuštanje i skidanje, varijacije mehanizama za otpuštanje sigurnosnog pojasa u automobilu. Obično sadrže jednu ili dvije kopče koje omogućavaju podešavanje duljine trake kako bi traka čvrsto sjela preko dna čeljusti. Skuplje kacige koriste mehanizam dvostrukog D prstena koji je mehanički jednostavniji, a tehnički superiorniji. Takav mehanizam ne zahtjeva kopče za podešavanje duljine i jednostavniji su za korištenje s rukavicama [30].

### 3. Sigurnosni standardi za ispitivanje kaciga

Sigurnosni standardi za ispitivanje kaciga uspostavljeni su u mnogim zemljama kako bi se mogla ocijeniti zaštitna funkcija kacige. U Europi i Sjevernoj Americi vlada regulira sigurnosne standardne, dok ih u nekim drugim zemljama izdaju privatne organizacije. Sigurnosni standardi propisuju čitav niz testova kako bi se osiguralo da kaciga sa svim svojim komponentama zadovoljava sigurnosne zahtjeve. Svaki standard za sebe ima različite zahtjeve koje je potrebno ispuniti, ali u ocjenjivanju učinka su svi gotovo isti. Osim zaštitne sigurnosti, ocjenjuju se i drugi parametri, primjerice udobnost, ventilacija zraka, težina, prianjanje i dr. Danas sve proizvedene kacige moraju zadovoljavati propisane standarde, ali prvenstveno su konstruirane kako bi smanjile otpor zraka, umjesto da je naglasak stavljen na optimizaciji sprječavanja ozljeda glave. U Europi kacige su regulirane ECE 22.05 standardom, dok se u UK koristi i BSI 6658 standard. ECE 22.05 najrašireniji je standard koji je na snazi u više od 50 zemalja svijeta. U SAD-u se regulacija odvija DOT FMVSS 2188 standardom, dok je najpoznatiji standard koji su izdale privatne organizacije Snell M2015. To su četiri najpoznatija standarda koji obuhvaćaju ne samo motociklističke kacige, već i za *motocross*, karting i sl. Gotovo svi standardi slijede iste koncepte u ocjenjivanju učinkovitosti kaciga prilikom sudara, a to su:

- kaciga mora biti sposobna apsorbirati dovoljno energije udarca,
- kaciga se mora zadržati na glavi za vrijeme udarca,
- kaciga se mora oduprijeti prodiranju.

Sličnosti među standardima korisne su za proizvođače koji imaju mogućnosti prodavati iste kacige u zemljama u kojima se koriste različiti standardi bez prevelikih promjena u dizajnu. Međutim, razlike su još uvijek znatne što dovodi do mogućnosti da jedan standard odobri kacigu dok ju drugi odbije. Na primjer, Snell M2015 i DOT FMVSS 2188 zahtijevaju test dvostrukog udara, dok ECE 22.05 zahtijeva samo jedan udar. U slučaju motociklističkih kaciga može se tvrditi da scenarij dvostrukog udara nije čest, ali je zahtjev na strani sigurnosti [6]. U tablici 1. prikazani su testovi koje određeni standard zahtijeva za odobrenje.

**Tablica 1. Pregled testova uvjetovanih standardom [6]**

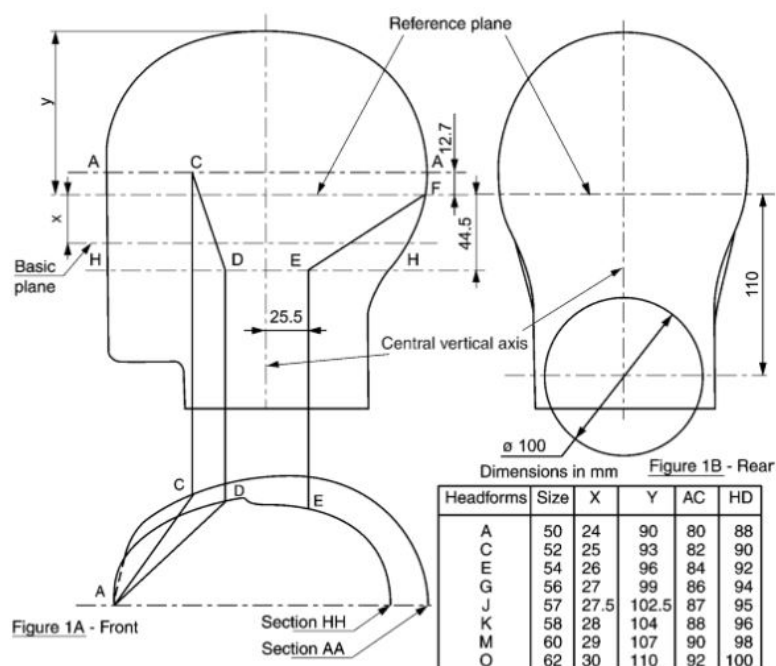
Standard \ Test	ECE 22.05	Snell M2015	DOT FMVSS218	BSI 6658
Udar	X	X	X	X
Prodiranje		X	X	
Zadržavanje	X	X	X	X
Odvaljivanje	X	X		X
Krutost	X			
Trenje	X			X

Prije svih ispitivanja, kacige se moraju kondicionirati tako da budu izložene okolišnoj temperaturi, niskoj te visokoj temperaturi. Izvode se i druge vrste kondicioniranja, primjerice kondicioniranje vlage ultra ljubičastim zračenjem. Iako je test prodiranja u nekim standardima obavezan, u praksi se rijetko događa da dođe do sudara sa šiljastim predmetima, što rezultira predimenzioniranim vanjskim ljuskama što direktno utječe na masu kacige. Usporedba između standarda, kada se promatra test udara, provodi se zbrajanjem uvjeta udara i kriterija loma (tablica 2). U testovima udara obično se koristi ravni nakovanj zbog činjenice da su najčešći udari oni sa cestom, ali postoje i druge vrste nakovanja. Korištenje ravnog nakovnja iziskuje standard ECE 22.05, hemisferični nakovanj BSI 6658 i DOT FMVSS 218 te rubni nakovanj za Snell M2015 standard. Test apsorpcije udara osmišljen je tako da se osigura to da kacige zadrže integritet konstrukcije i apsorbiraju što veći iznos energije udara pri raznim scenarijima sudara. U svim standardima, ispitivanja se provode na posebno konstruiranom ispitnom uređaju gdje kacige padaju vođenim slobodnim padom ubrzavajući do propisane brzine. Tijekom ispitivanja, ubrzanje se mjeri i bilježi triaksijalnim akcelerometrom smještenom u težištu krutog modela glave. Kod standarda koji zahtijevaju ispitivanja s više udara, u tablici 2. navedene su brzine prilikom prvog i prilikom drugog udara. Jedna od razlika standarda je ta što standard ECE 22.05 jedini za kriterij loma sadrži i HIC (kriterij ozljede glave) [6].

Tablica 2. Uvjeti udara i kriteriji loma za navedene standarde [6]

Standard	Snell M2015	DOT FMVSS 218	BSI 6658	ECE 22.05
Uvjeti udara				
Brzina				
Prva brzina	7,75 m/s	6,0 m/s	6,0 ili 6,5 m/s	7,5 m/s
Druga brzina	6,78 m/s	5,2 m/s	4,3 ili 4,5 m/s	-
Kriterij loma				
Maksimum	275 g	400 g	300 g	275 g
150 g	-	4 ms	-	-
200 g	-	2 ms	-	-
HIC	-	-	-	2400

Masa i veličina glave u svim standardima su gotovo iste. Na primjer, dimenzije modela glave ECE 22.05 i Snell M2015 temelje se na standardu ISO-DIS-6220 [6]. Slika 10. prikazuje sheme modela glave standarda ECE 22.05, a tablica 3. prikazuje vrijednosti mase za svaku veličinu.



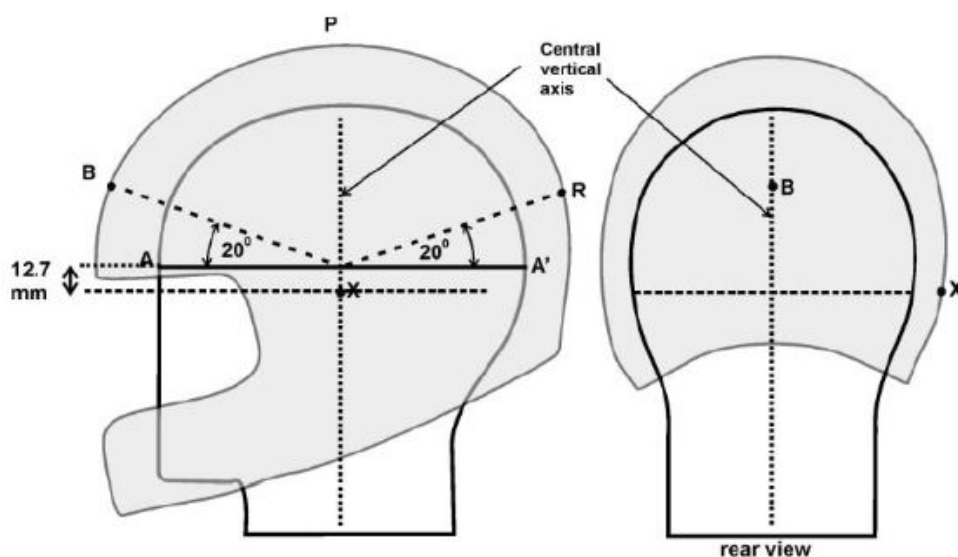
Slika 10. Shema modela glave za standard ECE 22.05 [31]



Tablica 3. Opće karakteristike ispitnih modela glave standarda ECE R22.05 [6]

Simbol	Veličina (cm)	Masa (kg)
A	50	$3,1 \pm 0,1$
E	54	$4,1 \pm 0,12$
J	57	$4,7 \pm 0,14$
M	60	$5,6 \pm 0,16$
O	62	$6,1 \pm 0,18$

Ovaj model glave razlikuje se od ostalih po izuzetno kratkom vratu. Pad modela glave s kacigom vođen je čeličnim vodilicama ili parom čeličnih sajli. Drugi standardi, kao što su DOT FMVSS 218 i Snell M2015 koriste okomito vođen model glave koji se ne može rotirati tijekom sudara, dok metoda nekontroliranog modela glave u ECE 22.05 standardu dopušta rotaciju u bilo kojem smjeru [6]. Standardi definiraju mjesta udara na kacigama, a ta područja prikazana su na slici 11.



Slika 11. Standard ECE 22.05 - točke udara [31]

Standardom ECE 22.05 definirane su četiri točke udara, a one su:

- točka B, smještena u prednjem dijelu okomite uzdužne ravnine simetrije kacige i pod kutom od  $20^\circ$  u odnosu na ravninu AA',
- točka X, smještena u lijevom ili desnom bočnom području, 12,7 mm udaljena od ravnine AA',
- točka R, smještena u stražnjem dijelu okomite uzdužne ravnine simetrije kacige i pod kutom od  $20^\circ$  u odnosu na ravninu AA',
- točka P, na sjecištu središnje okomite osi i površine vanjske ljuske.

Udari u točkama B, X i R trebaju biti unutar radijusa od 10 mm od definirane točke. Nakon svakog udara, kaciga se mora ispravno postaviti na model glave prije sljedećeg udara.

Brzine udara definirane standardima kreću se do 7,75 m/s, iako se tijekom vožnje motocikla postižu mnogo veće brzine. Ipak, brzina sudara obično nije ista kao i brzina vožnje. Kada motociklist pada, udar je obično kos, što znači da se brzina pada razlaže na dvije komponente, okomitu i tangencijalnu na površinu ceste. Ipak, ovaj raspon brzina udara koji se koristi u ispitivanjima na udar prema normama najčešći je u prometnim nesrećama. Osim toga, također je vrijedno napomenuti da se tangencijalna komponenta ne procjenjuje ni jednim standardom. Standardi koriste maksimalnu vrijednost ubrzanja izmjerenu tijekom udara kao kriterij loma. Pragovi svakog standarda prikazani su u tablici 2. Standard DOT FMVSS 218 definira maksimalne vremenske intervale za različite razine ubrzanja, dok Snell M2015 i BSI 6658 zanemaruju trajanje udara u svojoj evaluaciji. Ipak, standard ECE 22.05 uzima u obzir trajanje udara kroz kriterij ozljede glave (HIC):

$$HIC = \left( \left[ \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2.5} (t_2 - t_1) \right)_{max}, \quad (1)$$

gdje je  $a(t)$  rezultanto ubrzanje glave zadano u vrijednosti g, interval  $t_2 - t_1$  granica je svih mogućih intervala koji definiraju ukupno trajanje udara koje mora biti manja ili jednaka 36 ms, a  $t_1$  i  $t_2$  su bilo koje dvije točke impulsa ubrzanja u vremenu mjerene u sekundama [6].

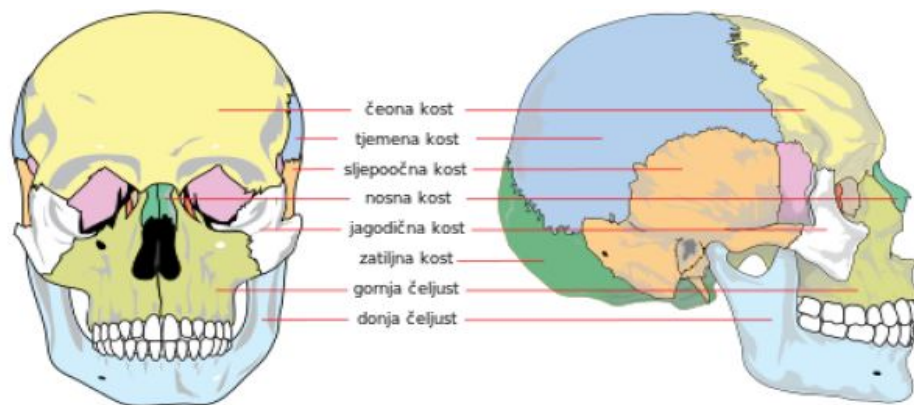
## 4. Anatomija i biomehanika ljudske glave

### 4.1. Lubanja

Lubanja je skup kostiju koja svojim oblikom podržava strukturu lica te stvara šupljinu za mozak. Primarna uloga joj je zaštita mozga od ozljeda. Sastoji se od tri dijela, različitog embriološkog podrijetla, a to su: neokranij, šavovi i kostur lica (viscerokranij). Neokranij tvori zaštitnu kranijalnu šupljinu koja okružuje i sadrži mozak i moždano deblo. Šavovi su prilično kruti spojevi između kostiju neokranija, tzv. nepokretni zglobovi nastali koštanom osifikacijom. Povezuju sve kosti, osim madibule (donje čeljusti) koja je jedina pokretna kost glave. Ljudska se lubanja sastoji od 22 kosti – 8 kranijalnih te 14 kostiju lica [32]. U tablici 4. navedene su kosti lubanje, a na slici 12. prikazani su položaji kostiju.

**Tablica 4. Kosti lubanje [33]**

<b>Kranijalne kosti</b>	<b>Kosti lica</b>
Zatiljna kost	Sitasta kost
Klinasta kost	2 nosne kosti
Čeona kost	2 kosti donje nosne školjke
2 tjemene kosti	Raonik
Kost fontanela	2 jagodične kosti
2 sljepoočne kosti	2 nepčane kosti
	2 kosti gornje čeljusti
	Donja čeljust



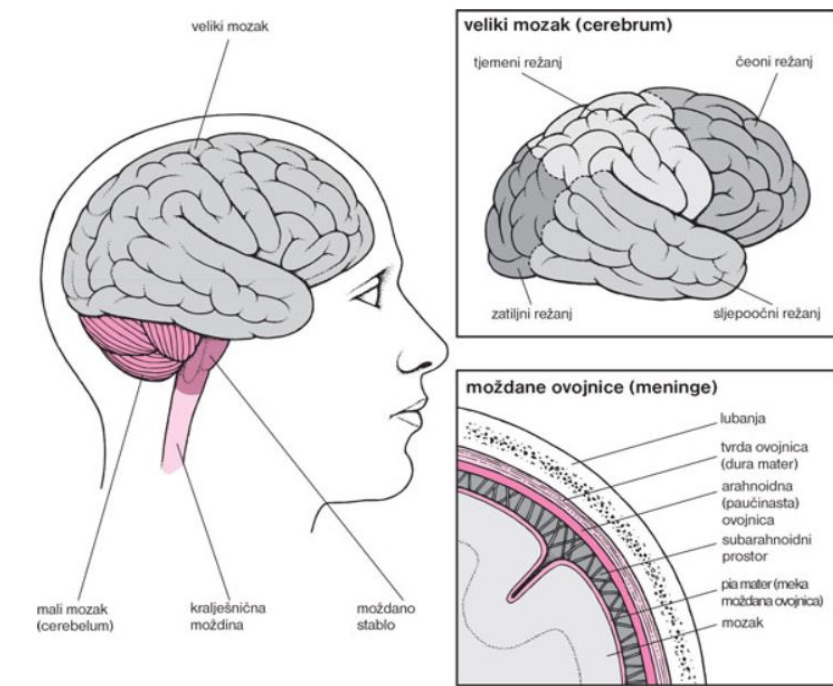
**Slika 12. Položaj kostiju lubanje [32]**

Lubanja sadrži i sinuse, šupljine ispunjene zrakom poznate kao paranazalni sinusi te brojne druge otvore. Sinusi su obloženi respiratornim epitelom. Njihove poznate funkcije su smanjenje mase lubanje, potpomaganje rezonancije glasa te zagrijavanje i vlaženje zraka koji ulazi u nosnu šupljinu [32].

#### **4.2. Mozak i moždane ovojnice**

Ljudski mozak vitalni je organ i centralni dio živčanog sustava. Prima signale koje šalju osjetilni organi preko živčanih vlakana, obrađuje ih te šalje povratne signale mišićima i ostalim ljudskim organima. Masa mu je u prosjeku 1,4 kg, što je oko 2% tjelesne mase čovjeka. Mozak muške osobe približno je 10% veći od mozga ženske osobe, odnosno volumen mozga muškarca je oko 1274 cm<sup>3</sup>, a žene 1131 cm<sup>3</sup>. Veliki mozak smješten je u prednjem dijelu lubanje i čini 85% ukupne težine mozga [34]. Smješten je unutar lubanje, obavijaju ga i štite moždane ovojnice, a uronjen je u cerebrospinalni likvor. Mozak dijelimo na: moždano deblo, u koje spada produžena moždina, most i srednji mozak, mali mozak te veliki mozak. Moždano deblo integracijski je organ središnjega živčanoga sustava. Moždano deblo nastavak je leđne moždine i nalazi se na njezinom vrhu. U moždanom deblu se nalaze osjetne, motoričke, miješane i vegetativne jezgre deset, od sveukupno dvanaest, moždanih živaca, integracijski centri koji upravljaju pokretima, te osjetilni, motorički i drugi dugački živčani putovi koji povezuju područja velikog mozga sa strukturama kralježnične moždine. Mali mozak kontrolira rada udova, kretanje trupa te očnih mišića. Prima sve potrebne informacije iz nadređenih centara smještenih u moždanoj kori te iz osjetnih sustava pomoću kojih osigurava glatko izvođenje pokreta ovisnih o prostoru i okolini. Veliki mozak dijeli se na dvije hemisfere povezane vlaknima žuljevitog tijela i supkortikalnim asocijativnim vlaknima. Vanjska površina velikog mozga građena je od sive tvari u obliku plćih i duljih brazda poznatijih kao moždane vijuge.

Pomoću moždanih vijuga površina velikog mozga znatno je povećana bez povećanja volumena mozga, a ona iznosi 2000 cm<sup>2</sup>. Funkcionalno, veliki je mozak, na svakoj od polutki, podijeljen na 5 režnjeva: čeonni (frontalni), tjemeni (parijentalni), sljepoočni (temporalni), zatiljni (okcipitalni) i rubni režanj ili limbički sustav. Čeonni režanj zadužen je za govorne funkcije te za kontrolu ponašanja. Tjemeni režanj služi za obradu informacija tjelesnih osjeta te ima važnu ulogu u kontroliranju kretanja i ponašanja. Sljepoočni režanj prima i procesira primarne slušne informacije, time omogućuje slušanje, a sudjeluje u psihičkoj obradi složenih osjetilnih doživljaja. Limbički sustav zadužen je za kontrolu vegetativnih, utrobnih i drugih autonomnih aktivnosti, a aktivan je i prilikom emocionalnih reakcijama. Iako je svaka polutka podijeljena na jednakih pet režnjeva, svaka ima svoju zasebnu ulogu. Lijeva moždana polutka odgovorna je za razumijevanje i sposobnost govora, čitanja i pisanja, programiranje te izvođenje motoričkih sposobnosti. Desna moždana polutka odgovorna je za prostornu orijentaciju, nadzor emocija, afektivnu komponentu govora. Obje polutke zajedno omogućuju da osoba dolazi do spoznaja i prepoznaje značenja osjetilnih informacija. Kao što je već navedeno, moždane ovojnice imaju zaštitnu ulogu. To su tri opne koje obavijaju mozak i leđnu moždinu, a one su: tvrda vanjska opna (*dura mater*), meka opna (*pia mater*) u kojoj se nalaze krvne žile te unutarnja paučinasta opna (*arahnoida*) koja održava mozak uronjenim u likvor [35]. Na slici 13. prikazani su dijelovi mozga, naznačeni položaji režnjeva te poprečni presjek moždanih ovojnica.

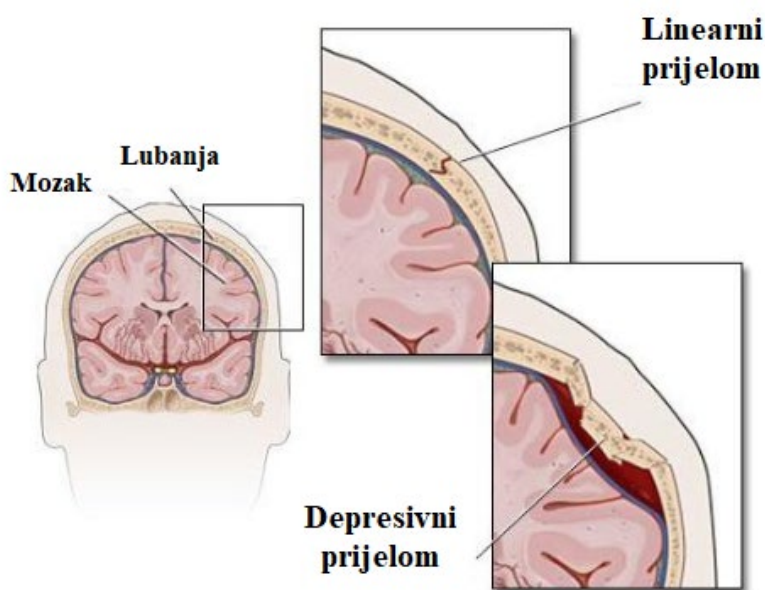


**Slika 13. Dijelovi mozga/položaji režnjeva/presjek moždanih ovojnica [36]**

### 4.3. Ozljede glave

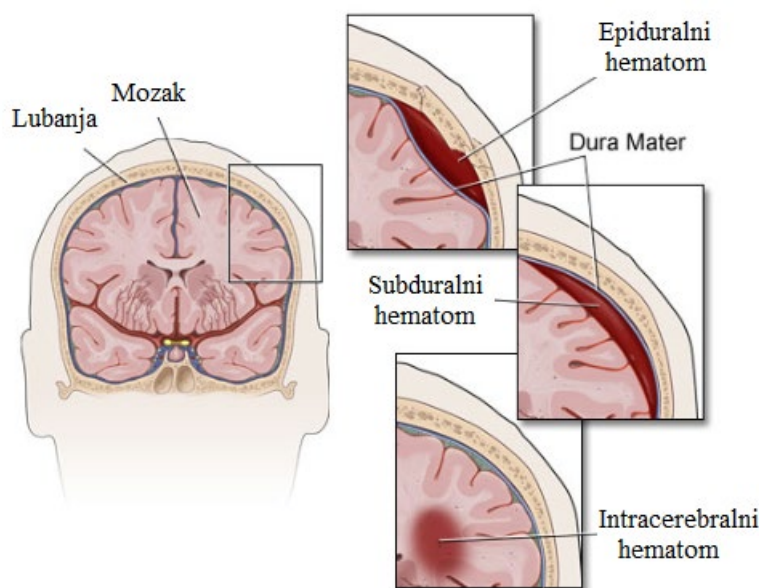
Ozljede glave nastaju zbog prekomjernog opterećenja na glavu. Kada se prekorači kapacitet opterećenja tkiva glave, to obično rezultira teškim ozljedama koje mogu uzrokovati invalidnost, a u nekim slučajevima i smrt. U slučajevima udara s kacigom, oštećenje mozga puno je češće od prijeloma lubanje zbog zaštitnog učinka same kacige. U brojkama, do ozljeda mozga dolazi u gotovo 60% slučajeva, a do prijeloma u oko 16% slučajeva.

Prijelom lubanje je prijelom jedne ili više kostiju lubanje koji se obično javlja kod sudara s tupim predmetom, odnosno kada je sila udara dovoljno jaka da prelomi kost u dodirnoj točki. Prijelomi se dijele na otvorene i zatvorene. Zatvoreni prijelom je prijelom u kojem ne dolazi do značajnih ozljeda okolnog tkiva i kože. S druge strane, kod otvorenog prijeloma dolazi do oštećenja kože i opasniji je od zatvorenog zbog popratnog rizika od infekcija uzrokovanih oštećenjem okolnog tkiva i direktnoj izloženosti patogenim tvarima. Prijelomi lubanje mogu se pojaviti sa i bez oštećenja mozga, ali sami po sebi nisu važan čimbenik pri neurološkim ozljedama, već do problema dolazi kada koštani odlomci oštete krvne žile ili moždano tkivo. Prijelomi lubanje također se mogu klasificirati kao linearni ili depresivni (slika 14.). Linearni prijelomi su češći i obično manje štetni. Kod njih dolazi do puknuća kosti kroz cijelu debljinu, ali nema pomaka. Depresivni prijelomi obično rezultiraju pomakom fragmenta kosti i često oštećenjem okolnog tkiva [6].



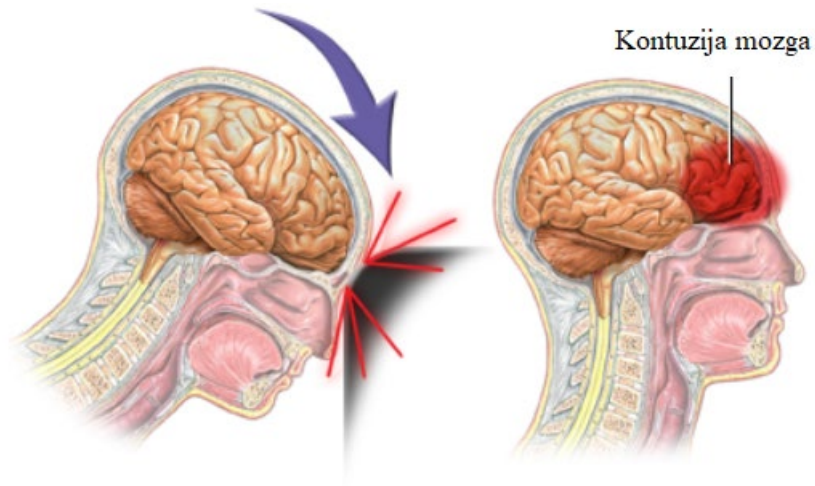
Slika 14. Linearni i depresivni prijelom lubanje [6]

Ozljede mozga javljaju se kao posljedica previsokih vlačnih ili tlačnih naprezanja u obliku lokaliziranih ozljeda. Ozljede mozga su u velikoj mjeri smrtonosne. Najčešće se radi o lokalnim oštećenjima, a dijele se na: epiduralni hematoma (EDH), subduralni hematoma (SDH), intracerebralni hematoma (ICH) te kontuziju mozga [6]. Na slici 15. prikazani su EDH, SDH te ICH.



Slika 15. Ozljede mozga [6]

Većina ozljeda mozga nastaje zbog izravnog kontakta s fragmentima kostiju, ukoliko je došlo do prijeloma lubanje ili zbog relativnog kretanja između lubanje i mozga. Primjer ozljeda koje nastaju zbog relativnog kretanja, koje su uglavnom rezultat izravnih udara, su subduralni hematomi s blagim ili težim depresijskim prijelomom lubanje. EDH rezultat je deformacije lubanje ili ozljede vanjske moždane ovojnice. Iznimno je opasan jer rezultira velikim nakupljanjem krvi što povećava intrakranijalni tlak (tlak cerebrospinalne tekućine unutar lubanje). SDH često je uzrokovan rupturom arterije ili vene. Ova vrsta ozljede proizlazi iz tangencijalne sile i izravno je povezana s rotacijskim posljedicama mozga. Nakon udarca u glavu, mozak zaostaje u odnosu na lubanju što dovodi do uzdužnog naprezanja u venama što dalje dovodi i do same rupture vena. Kontuzija je najčešći oblik ozljede mozga nakon udarca u glavu. Sastoji se od heterogenih područja nekroze, krvarenja ili edema. Kontuzije (slika 16.) nastaju zbog lokalnog pomicanja tkiva unutar lubanje, a mogu se pojaviti i na mjestu depresivnih prijeloma lubanje. Na primjer, u frontalnom udaru, mozak se pomiče u odnosu na lubanju na način da sabija područje u blizini udarca i rasteže suprotno područje [6].



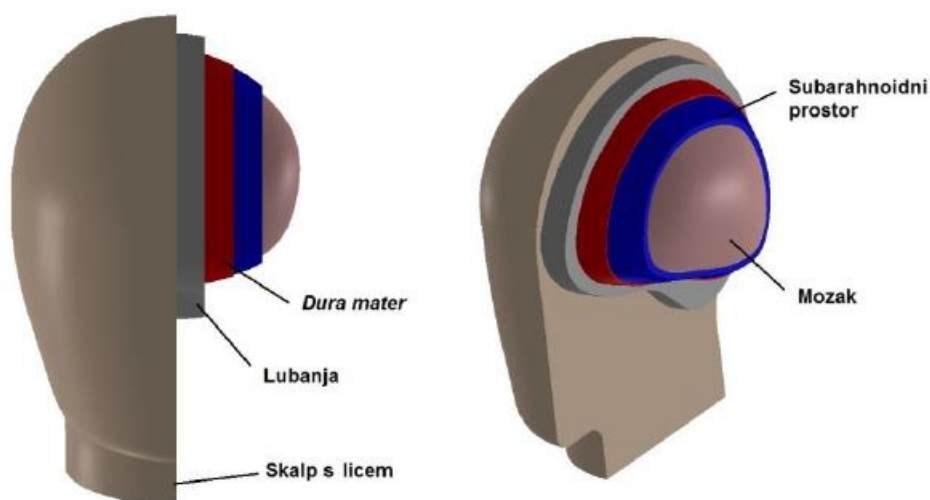
**Slika 16. Kontuzija mozga [37]**

ICH su velike količine krvi u mozgu. Obično su uzrokovani naglim ubrzanjem i usporavanjem glave. ICH razlikuje se od kontuzije po izraženijoj lokalizaciji hematoma. Ova vrsta ozljede razmatra se kao ozljeda najmanjeg značaja [6].



## 5. Numerički model glave

Za potrebe ovog diplomskog rada, numerički model glave preuzet je iz [38]. Navedeni model dobiven je iz CT snimki koje su prvo obrađene u programskom paketu *Mimics*, medicinskom inženjerskom softveru koji služi za dobivanje 3D modela iz raznih medicinskih snimki, zatim se dobiveni model prebacuje u programski paket *SolidWorks* u kojem se dobiva završni model koji se dalje koristi kao ispitni. Na slici 17. prikazan je ispitni model u presjeku.



Slika 17. Ispitni model [38]

Kao što je vidljivo, sam model je značajno pojednostavljen u odnosu na stvarni, izbjegnuto je nepravilni oblik glave, mozga i okolnih dijelova. Razlog tome je jednostavnija izrada modela te kasnije jednostavnija provedba numeričke analize. Modelirani dijelovi su: skalp s licem, lubanja, dura mater, subarahnoidni prostor koji obuhvaća i cerebrospinalni likvor te mozak.

Ispitni model analizira se u programu *Abaqus/Explicit*. Za provedbu simulacije potrebno je koristiti cijeli model, iako je isti simetričan, zbog nesimetrije vanjske ljuske kacige, odnosno različitih rasporeda slojeva. Dijelovi su povezani kinematskom vezom *Tie* koja onemogućava odvajanje dodirnih površina te su pri modeliranju mreža konačnih elemenata svih dijelova korišteni linearni tetraedarski C3D4 konačni elementi. Pregled mreža konačnih elemenata pojedinog dijela te cjelokupnog modela prikazan je tablicom 5.

**Tablica 5. Pregled mreža konačnih elemenata**

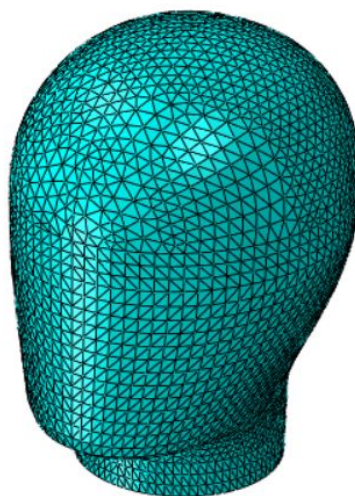
	Broj elemenata	Broj čvorova
Skalp s licem	62314	13095
Lubanja	21406	5458
Dura Mater	24375	7985
Subarahnoidni prostor	10853	3533
Mozak	67314	12718
Cjelokupni model	185929	42789

### 5.1. Numerički model skalpa s licem

Vanjski dio glave modeliran je prema modelima ispitnih glava koje propisuje standard ISO/EN 960. Kostii lica nisu modelirane radi pojednostavljene izvedbe modela. Masa modela iznosi 2,29 kg, a za modeliranje korištena su linearno elastična svojstva materijala. Korištena materijalna svojstva prikazana su u tablici 6., a mreža konačnih elemenata skalpa s licem na slici 18.

**Tablica 6. Materijalna svojstva skalpa s licem [38]**

$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$m$ [kg]	$E$ [MPa]	$\nu$ [-]
1000	2,29	16,7	0,42

**Slika 18. Mreža konačnih elemenata skalpa s licem**

## 5.2. Numerički model lubanje

Model lubanje nastavlja se na model skalpa s licem, odnosno veže se za unutarnju površinu skalpa. Uz pojednostavljenje geometrije lubanje, pojednostavljenja su uvedena i kod definiranja materijala. Lubanja, kao i ostale strukturalne kosti ljudskog kostura, sastoji se od čvrste (kortikalne) i spužvaste (trabekularne) kosti. S obzirom da je spužvasta kost građena od mreže trabekula, što bi bilo iznimno komplicirano za modeliranje, za opisivanje ponašanja lubanje promatrana je samo kortikalna kost. Zbog modeliranja samo čvrste kosti, masa numeričkog modela nešto je veća od prosječne mase koja iznosi oko 1 kg. Korišten je linearno elastični model ponašanja materijala (tablica 7.)

**Tablica 7. Materijalna svojstva modela lubanje [38]**

$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$m$ [kg]	$E$ [MPa]	$\nu$ [-]
1900	1,27	15000	0,21

## 5.3. Numerički model *Dura Mater*

*Dura mater* modelirana je kao ljuska jednolike debljine od 1mm. Nastavlja se na model lubanje tako što se vanjska površina naslanja na unutarnju površinu lubanje. Masa iznosi 0,074 kg i također je korišten linearno elastični model za opisivanje svojstava materijala. Ovojnice *arachnoidea mater* i *pia mater*, zbog pojednostavljena modela, nisu modelirane. Materijalna svojstva korištena za opisivanje *dura mater* prikazana su u tablici 8.

**Tablica 8. Materijalna svojstva modela *Dura mater* [38]**

$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$m$ [kg]	$E$ [MPa]	$\nu$ [-]
1140	0,074	31,5	0,45

#### 5.4. Numerički model subarahnoidnog prostora

Subarahnoidni prostor nalazi se između ovojnice dura mater i mozga te on sadrži ovojnice *arachnoidea mater* i *pia mater*, cerebrospinalnu tekućinu te sustav arterija i vena koje okružuju sam mozak. Modeliran je kao ovojnica konstantne debljine od 3 mm te prijanja direktno na ovojnicu *dura mater*. Masa subarahnoidnog prostora iznosi 0,191 kg. Za opisivanje ponašanja materijala, korišten je hiperelastični model materijala koristeći *Mooney-Rivlin* energetska potencijal deformacije. U tablici 9. dane su vrijednosti korištene za opisivanje materijala.

**Tablica 9. Materijalna svojstva modela subarahnoidnog prostora [1]**

$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_{10}$ [MPa]	$C_{01}$ [MPa]	$D_1$ [MPa <sup>-1</sup> ]
1000	0,9	1	0,9

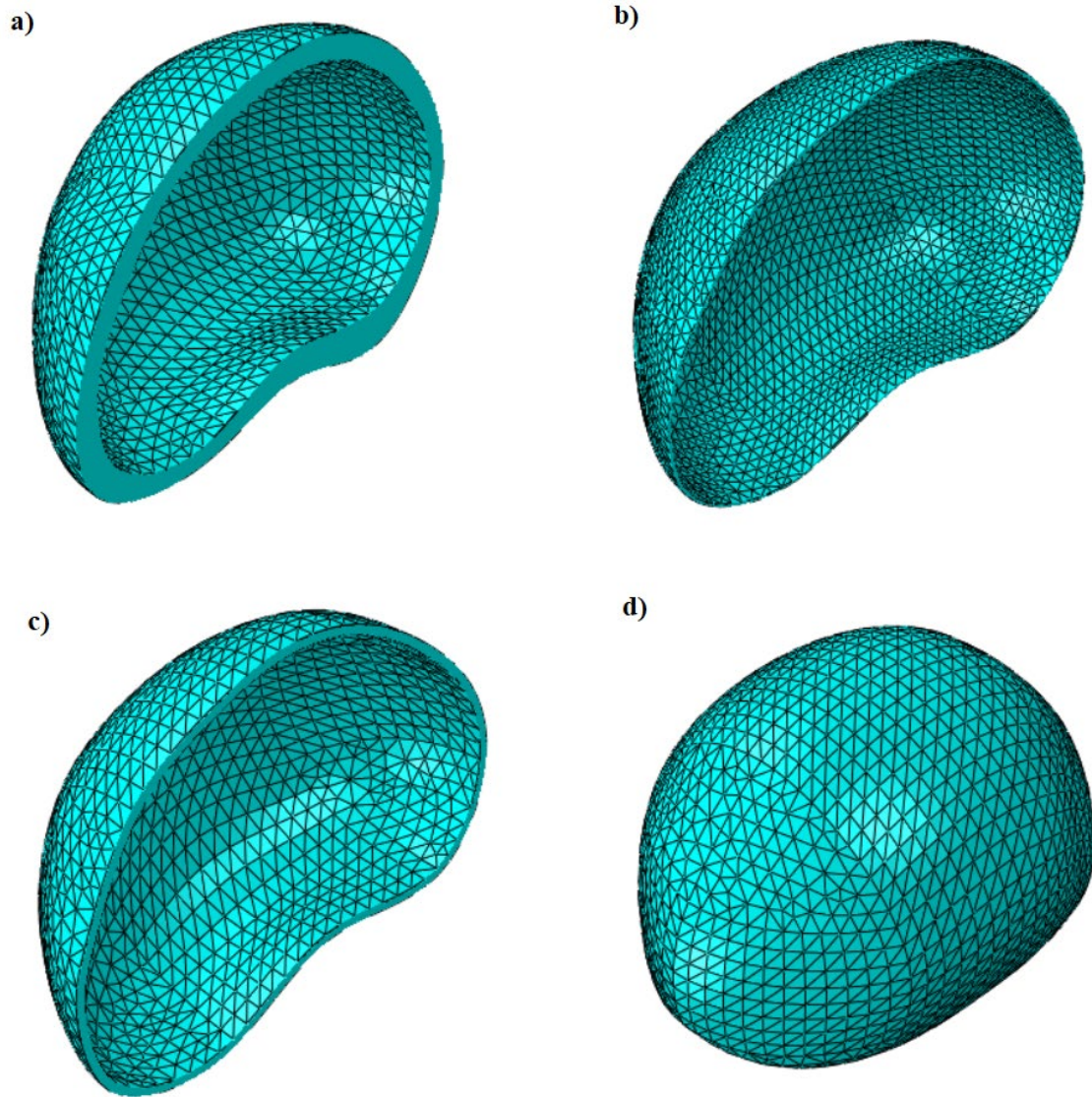
#### 5.5. Numerički model mozga

Radi pojednostavljenja modela, mali mozak i moždano deblo nisu modelirani te je mozak modeliran kao jedna cjelina, bez podjela na lijevu i desnu hemisferu. Mozak je smješten u modelu subarahnoidnog prostora kojeg u postupnosti popunjava. Masa modela mozga iznosi 1,44 kg, a pri modeliranju korišten je viskoelastični model ponašanja materijala. Tablicom 10. prikazani su iznosi materijalnih parametara korištenih za modeliranje.

**Tablica 10. Materijalna svojstva modela mozga [38]**

$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$m$ [kg]	$E$ [MPa]	$\nu$ [-]	$\bar{g}_i^P$ [-]	$\bar{k}_i^P$	$\tau_i$ [s]
1140	1,44	0,01	0,49	0,5837	0,2387	0,02571

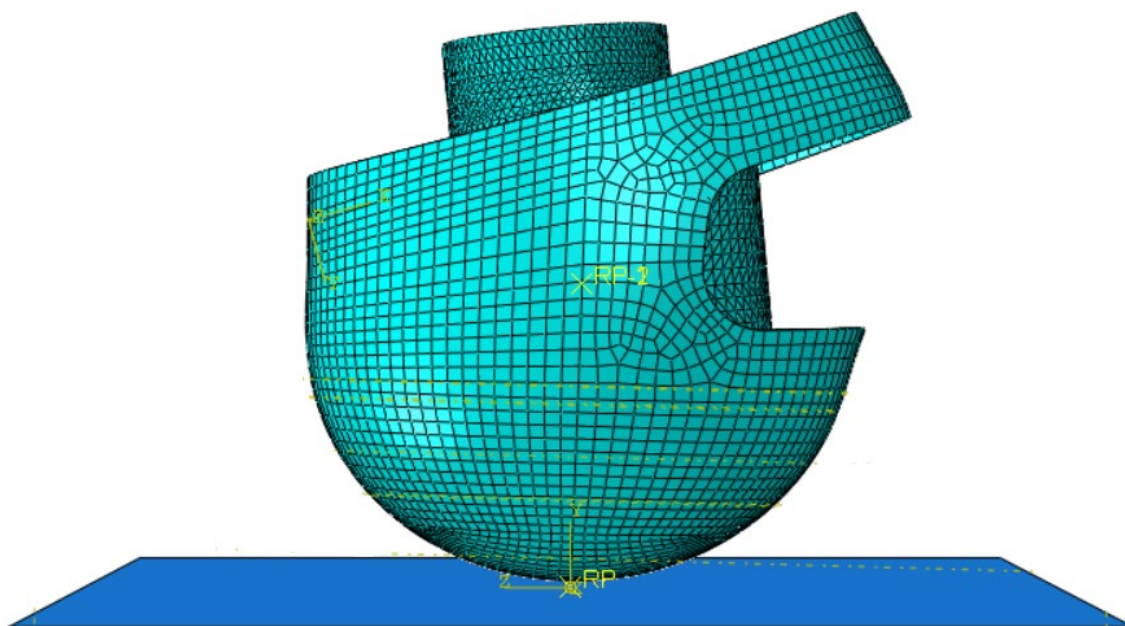
Slikom 19. prikazane su mreže konačnih elemenata modela lubanje, dure mater, subarahnoidnog prostora te mozga. Numerički modeli lubanje, dure mater i subarahnoidnog prostora prikazani su u presjeku.



Slika 19. Numerički modeli a) lubanje b) dure mater c) subarahnoidnog prostora d) mozga

## 6. Numerički model kacige

Model kacige modeliran je po uzoru na zatvoreni tip kacige. Model sadrži vanjsku ljusku te apsorpcijski sloj, ergonomski sloj, vizir i sustav za učvršćivanje i vezanje nisu modelirani zbog pojednostavljenja modela. Prosječna masa kaciga na tržištu iznosi između 1-1,5 kg, a masa numeričkog modela kacige iznosi 1,13 kg. Prilikom izrade mreža konačnih elemenata, za vanjsku kompozitnu ljusku, korišteni su heksaedarski kontinuirani ljuskasti SC8R elementi, zbog pretpostavke o ravninskom naprezanju, te trodimenzionalni C3D8R elementi za apsorpcijski sloj. Čvorovi navedenih tipova elemenata omogućuju samo translacijske stupnjeve slobode gibanja što rezultira dobrom povezanošću mreža konačnih elemenata vanjske ljuske i apsorpcijskog sloja. S obzirom da je u radu simuliran udarac u tjemeni dio, zbog jednostavnosti je izostavljen donji dio apsorpcijskog sloja te je isti modeliran s jednakom debljinom presjeka po cijelom modelu. Prilikom simuliranja udara, korištena su dva načina povezivanja vanjske ljuske i apsorpcijskog sloja: kinematskom vezom *Tie* te kohezivnim elementima. Kompozitni materijali korišteni za vanjsku ljusku su staklena vlakna s epoksidnom matricom te ugljična vlakna s epoksidnom matricom, a za materijale apsorpcijskog sloja izabrani su aglomerirani pluto te ekspanzirana polipropilenska pjena. Navedene kombinacije materijala u modelima uspoređivane su s modelom iz [37] u kojem je za materijal apsorpcijskog sloja korištena pjena od ekspaniranog polistirena te za materijal vanjske ljuske također ugljična vlakna s epoksidnom matricom. Numerička analiza provedena je prema standardu ECE R22.05, odnosno simuliran je udarac u tjemeni dio s početnom brzinom od 7,5 m/s sa standardom zadanim rubnim uvjetima. Model kacige udara u krutu podlogu, koja je modelirana kao pravokutna trodimenzionalna kruta ljuska, stoga joj nije potrebno definirati nikakva materijalna svojstva. U samom središtu krute podloge postavljena je referentna točka u kojoj je definirano uklještenje kako bi se spriječili pomaci podloge. Početni položaj kompletnog modela prikazan je slikom 20. Kontakt između svih površina definiran je kao *General Contact* s faktorom trenja 0,4, a između modela kacige i krute podloge definiran je tvrdi kontakt. Vrijeme trajanja svih simulacije je 8 ms.



Slika 20. Početni položaj numeričkog modela

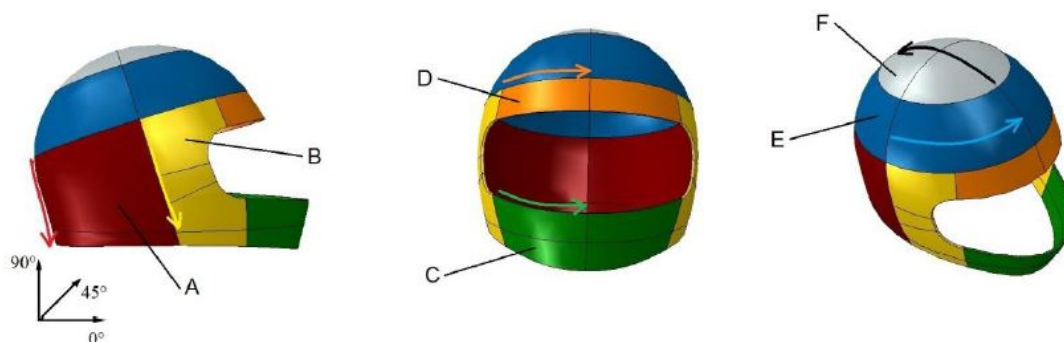
U radu su provedene simulacije s četiri kombinacije materijala. Korištene kombinacije prikazane su tablicom 11.

Tablica 11. Kombinacije materijala korištene za simulacije

	Vanjska ljuska	Apsorpcijski sloj
Prvi model	Epoksidna matrica s ugljičnim vlaknima	EPP
Drugi model	Epoksidna matrica s ugljičnim vlaknima	Pluto
Treći model	Epoksidna matrica sa staklenim vlaknima	EPP
Četvrti model	Epoksidna matrica sa staklenim vlaknima	Pluto

## 6.1. Numerički model preuzete vanjske ljuske

Kao što je već navedeno, za modeliranje vanjske ljuske korišteni su kompozitni materijali (staklena vlakna s epoksidnom matricom i ugljična vlakna s epoksidnom matricom) iako su danas na tržištu i dalje u velikoj mjeri dostupne i kacige s termoplastičnim vanjskim ljuskama, kao što su ljuske od ABS-a. U oba slučaja korištena je ista geometrija, a debljina kacige jednolična je po cijelom modelu i iznosi 3 mm, što ulazi u raspon debljina ljusaka kaciga na tržištu koji iznosi od 1,3 do 4 mm. Masa ljuske iznosi 0,879 kg. Ljuska kacige podijeljena je na više dijelova, a svaki od dijelova ima svoj raspored slojeva. Pri izradi mreže konačnih elemenata, postavljena su dva elementa po debljini od kojih svaki sadrži 12 kompozitnih slojeva debljine 0,125 mm. S obzirom na dva postavljena elementa po debljini ljuske, to ukupno čini 24 sloja kompozita koji su postavljeni tako da je prvi sloj u dodiru sa apsorpcijskim slojem, a ostali se nastavljaju na njega u smjeru normalne što znači da će 24. sloj (odnosno 12. sloj konačnog elementa) biti u kontaktu s krutom podlogom. Orijentacija kompozitnih slojeva određena je referentnom osi koja je definirana posebno za svaki dio ljuske. Raspored slojeva kacige u ovom radu rađen je po uzoru na model kacige AGV-T2. Na slici 21. prikazan je model kacige na kojem su različitim bojama i slovima prikazani različiti dijelovi kacige, a u tablici 12. prikazani su rasporedi slojeva za svaki naznačeni dio.



Slika 21. Naznačeni dijelovi kacige [38]



Tablica 12. Raspored slojeva vanjske ljuske [38]

Oznaka	Orijentacija slojeva
A	[0/30/-30/0/90/0/90/0/90/30/-30/0]
B	[0/90/60/-60/30/-30/30/-30/60/-60/0/90]
C	[0/90/0/90/30/-30/30/-30/30/-30/90/0]
D	[0/90/30/-30/30/-30/0/90/30/-30/30/-30]
E	[0/90/30/-30/30/-30/30/-30/0/90/30/-30]
F	[0/90/30/-30/30/-30/30/-30/30/-30/0/90]

Materijalni model kompozitne ljuske kacige u ravninskom stanju naprezanja je ortotropan. Svojstva epoksidne smole s ugljičnim vlaknima dana su tablicom 13., a epoksidne smole sa staklenim vlaknima tablicom 14. gdje su :

- $E_1$  - modul elastičnosti u smjeru vlakana,
- $E_2$  - modul elastičnosti u smjeru okomitom na smjer vlakana,
- $\nu_{12}$  – Poissonov koeficijent u ravnini 1-2,
- $G_{ij}$  - modul smicanja u ravnini i-j,
- $X^T$  - vlačna čvrstoća u smjeru vlakana,
- $X^C$  - tlačna čvrstoća u smjeru vlakana,
- $Y^T$  - vlačna čvrstoća u smjeru okomitom na smjer vlakana,
- $Y^C$  - tlačna čvrstoća u smjeru okomitom na smjer vlakana,
- $S$  - smična čvrstoća,
- $G_{1T}$  - vlačna energija loma u smjeru vlakana,
- $G_{1C}$  - tlačna energija loma u smjeru vlakana,
- $G_{2T}$  - vlačna energija loma u smjeru okomitom na smjer vlakana,
- $G_{2C}$  - tlačna energija loma u smjeru okomitom na smjer vlakana.

Tablica 13. Svojstva epoksidne smole s ugljičnim vlaknima [38]

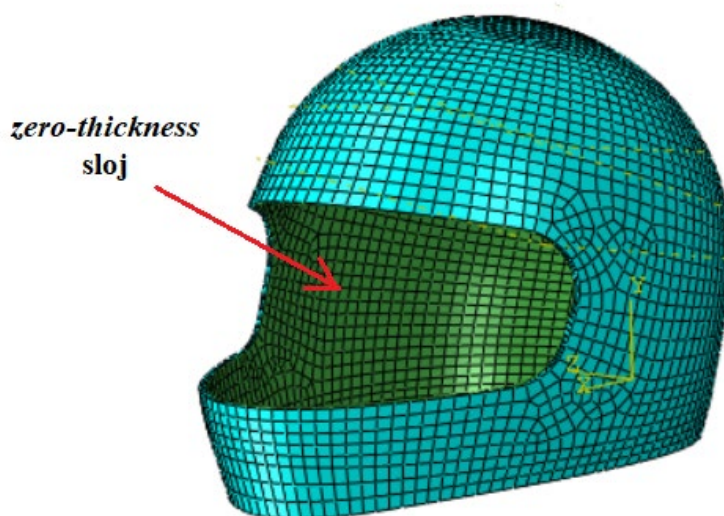
$E_1$ [MPa]	$E_2$ [MPa]	$\nu_{12}$ [-]	$G_{12}$ [MPa]	$G_{13}$ [MPa]	$G_{23}$ [MPa]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]		
138000	9000	0,32	4800	4800	3200	1543		
$X^T$ [MPa]	$X^C$ [MPa]	$Y^T$ [MPa]	$Y^C$ [MPa]	$S$ [MPa]	$G_{1T}$ [J/m <sup>2</sup> ]	$G_{1T}$ [J/m <sup>2</sup> ]	$G_{1T}$ [J/m <sup>2</sup> ]	$G_{1T}$ [J/m <sup>2</sup> ]
1520	1520	60	246	95	85000	106300	1000	1000

Tablica 14. Svojstva epoksidne smole sa staklenim vlaknima [39], [40]

$E_1$ [MPa]	$E_2$ [MPa]	$\nu_{12}$ [-]	$G_{12}$ [MPa]	$G_{13}$ [MPa]	$G_{23}$ [MPa]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]		
30900	8300	0,0866	2800	2800	3000	1800		
$X^T$ [MPa]	$X^C$ [MPa]	$Y^T$ [MPa]	$Y^C$ [MPa]	$S$ [MPa]	$G_{1T}$ [J/m <sup>2</sup> ]	$G_{1T}$ [J/m <sup>2</sup> ]	$G_{1T}$ [J/m <sup>2</sup> ]	$G_{1T}$ [J/m <sup>2</sup> ]
798	480	40	140	70	1290000	757000	78000	45500

## 6.2. Numerički model vanjske ljuske s kohezivnim elementima

Uz prethodno opisani numerički model vanjske ljuske, koji je korišten za analiziranje oštećenja i usporedbu rezultata s rezultatima dobivenim u [38] prilikom udarnog oštećenja, korišten je i numerički model vanjske ljuske koji sadrži kohezivne elemente u svrhu analiziranja kohezivnog ponašanja, odnosno simulaciju nastanka i širenja interlaminarnog oštećenja. Modeliranje kohezivne zone jedan je od čestih načina analiziranja pojave i propagacije oštećenja kod modela kompozitnih konstrukcija. Sama metoda temeljena je na zakonu vlačnog naprezanja i odvajanja, poznatija kao kohezivni zakon. U programskom paketu *Abaqus* postoje dva načina modeliranja kohezivnog ponašanja – modeliranje pomoću konačnih kohezivnih elemenata i modeliranje pomoću površina kohezivnog ponašanja. U ovom radu korišten je pristup modeliranja pomoću kohezivnih elemenata. Kohezivna zona postavljena je na spoju unutarnje plohe vanjske ljuske i vanjske plohe apsorpcijskog sloja i predstavlja sloj ljepila koji spaja dva navedena dijela. Na tom dijelu potrebno je isključiti prethodno postavljenu vezu *Tie* kako bi dobiveni rezultati bili posljedica isključivo kohezivnog ponašanja. Kod modela kohezivne zone ponašanje kohezivnih elemenata temelji se na *traction-separation* zakonu koji definira naprezanja na određenom mjestu kao funkciju pojave, odnosno propagacije oštećenja. Na unutarnjoj plohi vanjske ljuske, pomoću *offset* metode, kreirane je *zero-thickness* sloj. Nakon kreiranja *zero-thickness* sloja, *Abaqus* njegov položaj prikazuje zelenom bojom (slika 22.)



Slika 22. Položaj *zero-thickness* sloja

Kreiranom *zero-thickness* sloju dodijeljeni su kohezivni konačni elementi COH3D8 i mehanička svojstva kohezivnog ponašanja. Mehanička svojstva kohezivnog ponašanja prikazana su u tablici 16., gdje su:

- $G_{IC}, G_{IIC}, G_{IIIC}$  – kritične vrijednosti energije loma,
- $\tau_{IC}$  – međuslojna vlačna čvrstoća,
- $\tau_{IIC}, \tau_{IIIC}$  – međuslojna smična čvrstoća,
- $E (E_m)$  – modul elastičnosti međusloja,
- $G_1, G_2$  – smični modul međusloja,
- $K$  – *penalty* krutost,
- $\eta$  – parametar B-K kriterija.

**Tablica 15. Mehanička svojstva kohezivnog ponašanja [42]**

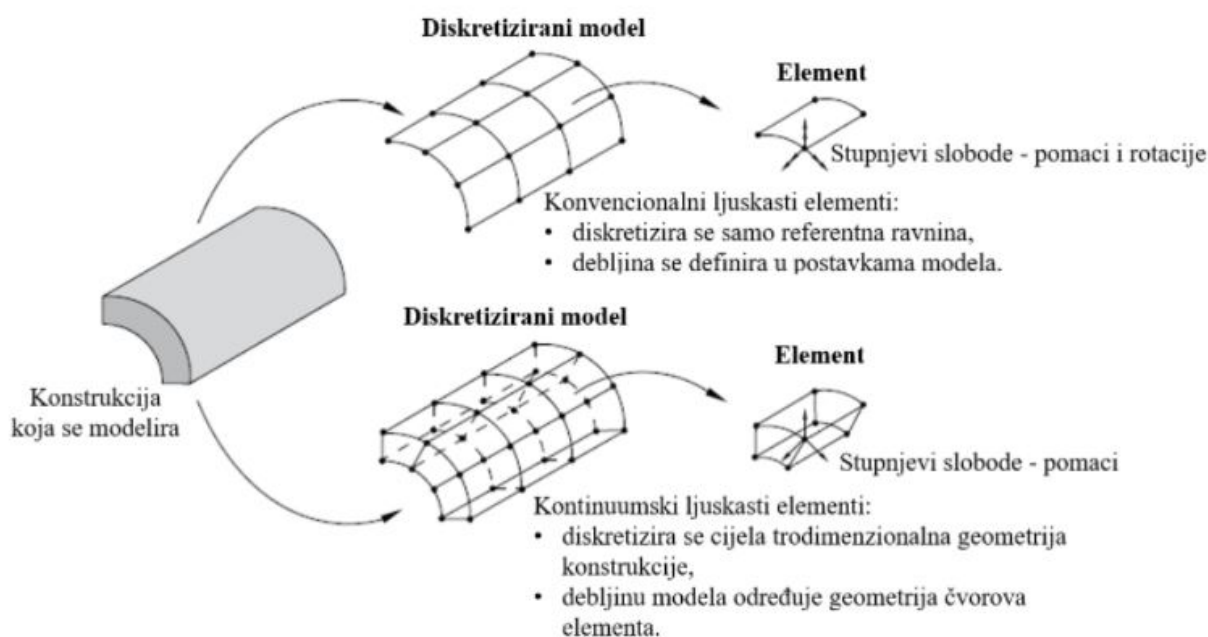
$G_{IC} = G_{IIC} = G_{IIIC}$ [MPa]	$\tau_{IC}$ [MPa]	$\tau_{2C} = \tau_{3C}$ [MPa]	$E (E_m)$ [MPa]	$G_1 = G_2$ [MPa]	$K$ [N/mm <sup>3</sup> ]	$\eta$ [-]
0,149	54	34	3650	1380	10 <sup>5</sup>	1

Prilikom opisivanja svojstava materijala, korišten je *Quads Damage* model koji predviđa početak oštećenja u kohezivnim elementima preko omjera između zadane vrijednosti međuslojnih čvrstoća i nominalne vrijednosti naprezanja. Uz *Quads Damage*, odabrana je pod opcija *Damage Evolution* u kojoj je dodatno definirano da se nastanak i širenje oštećenja promatra pomoću B-K zakona. Sam B-K zakon dodatno je pojašnjen kasnije u tekstu.

Mreža konačnih kohezivnih elemenata sadrži 11181 element. Sloju kohezivnih konačnih elemenata dodijeljen je *Traction Separation Response* model u *Section* izborniku koji u početku predstavlja linearno elastično ponašanje kohezivnih elemenata nakon čega slijedi nastajanje i propagacija oštećenja.

### 6.2.1. Heksaedarski kontinuirani ljuskasti elementi SC8R

Kod izrade mreže konačnih elemenata kompozitnih konstrukcija, najčešće se koriste heksaedarski kontinuirani ljuskasti elementi SC8R. Navedeni elementi koriste se i kod modeliranja *sandwich* konstrukcija, monolitnih kompozitnih panela i slično. U programskom paketu *Abaqus* razlikuju se dva tipa implementiranih ljuskastih elemenata - konvencionalni i kontinuumski ljuskasti elementi [41]. Na slici 23. prikazane su razlike između dva navedena tipa ljuskastih elemenata.



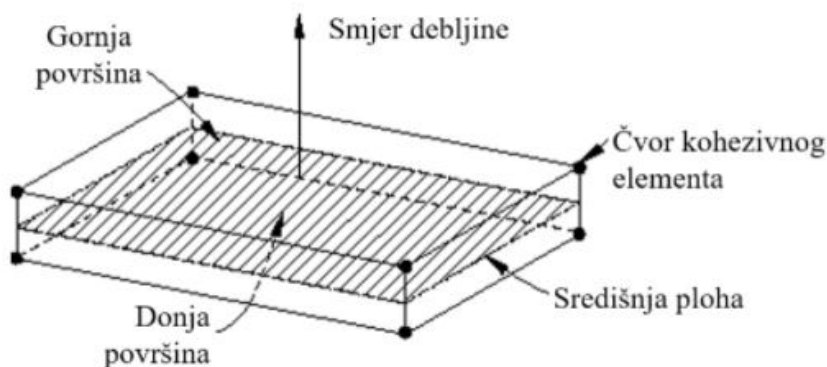
Slika 23. Razlika konvencionalnih i kontinuumskih ljuskastih konačnih elemenata [41]

Iz slike 23. vidljivo je kako se konvencionalnim elementima diskretizira referentna ravnina, dok se debljina definira u samim postavkama modela, a kontinuumskim elementima se diskretizira cijela trodimenzionalna konstrukcija i debljina je određena iz geometrije čvorova elementa. Iako su glavne poveznice konvencionalnih i kontinuumskih elemenata konstitutivne i kinetičke relacije kojima su matematički opisani, stupnjevi slobode čvorova konvencionalnih elemenata dozvoljavaju pomake i rotacije u sve tri osi, dok čvorovi kontinuumskih elemenata dozvoljavaju isključivo translacijske pomake. Kontinuumski elementi prikladni su za korištenje kod linearnog i nelinearnog ponašanja modela, kod modela malih debljina, te kod modeliranja kontakta, primjerice udarni kontakt, i odziva, primjerice naprezanja i deformacije, kompozitnih

konstrukcija. Kontinuumski ljuskasti konačni element, u odnosu na konvencionalni, omogućuje detaljniju analizu kroz debljinu konstrukcije, posebno ako je potrebno razmatrati sloj po sloj kompozita te omogućuje precizniju simulaciju kada se radi o udarnim opterećenjima, kao što je slučaj u ovom radu. SC8R konačni element omogućava diskretizaciju tankih geometrija, odnosno ukoliko se radi o konstrukciji kojoj je dimenzija debljina znatno manja u odnosu na ostale dvije, ne dolazi do distorzije elemenata [41].

### 6.2.2. Kohezivni konačni element COH3D8

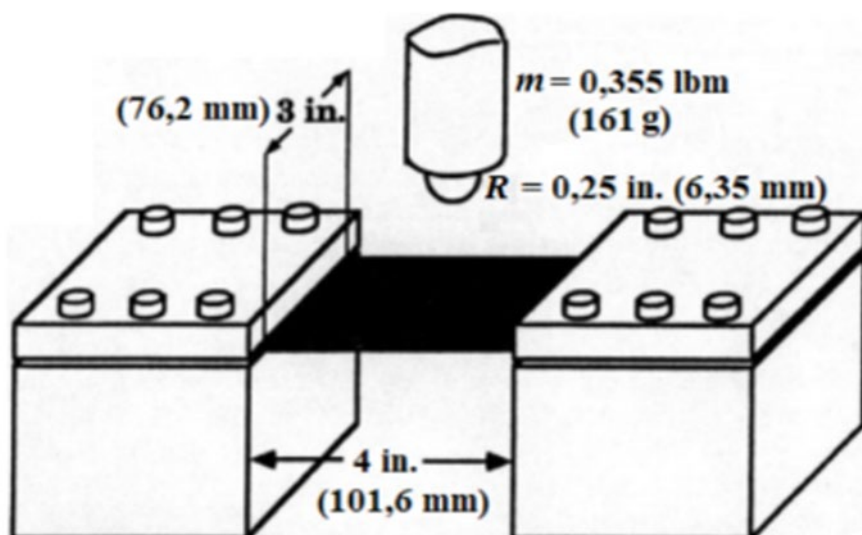
Kod opisivanja kohezivnog ponašanja u programskom paketu *Abaqus* koriste se kohezivni konačni elementi. Oni su trodimenzionalni elementi sastavljeni od dviju ploha između kojih se nalazi kohezivna površina. Element sadrži 8 čvorova te skica istoga, s naznačenim površinama i smjerom normale odnosno debljine, prikazana je slikom 24. Kohezivni elementi koriste se prilikom modeliranja brtvi, lijepljenih spojeva, spojeva krutih i deformabilnih komponenti te kod analize delaminacija [41].



Slika 24. Shematski prikaz kohezivnog elementa [41]

### 6.3. Numerički model kompozitne ploče

U svrhu validacije primijenjenih parametara i mehanizama kohezivnog ponašanja numeričkog modela koji je prethodno opisan, odabran je problem iz literature [42]. U [42] provedeni su eksperimenti pri kojima se ispitalo udarno oštećenje kompozitnih ploča uz variranje brzine udara. Uz varijaciju brzine, mijenjani su i broj i orijentacija slojeva u svrhu određivanja utjecaja rasporeda slojeva na pojavu oštećenja. Rubni uvjeti i primijenjeni parametri preuzeti su iz navedene literature. Na slici 25. prikazan je shematski prikaz uređaja za ispitivanje s uzorkom kompozitne ploče. Iako su na samom modelu mjerne jedinice iskazane u anglosaksonskom mjernom sustavu, za potrebe ovog rada korišten je SI sustav mjernih jedinica.



Slika 25. Model za ispitivanje udarnog opterećenja [42]

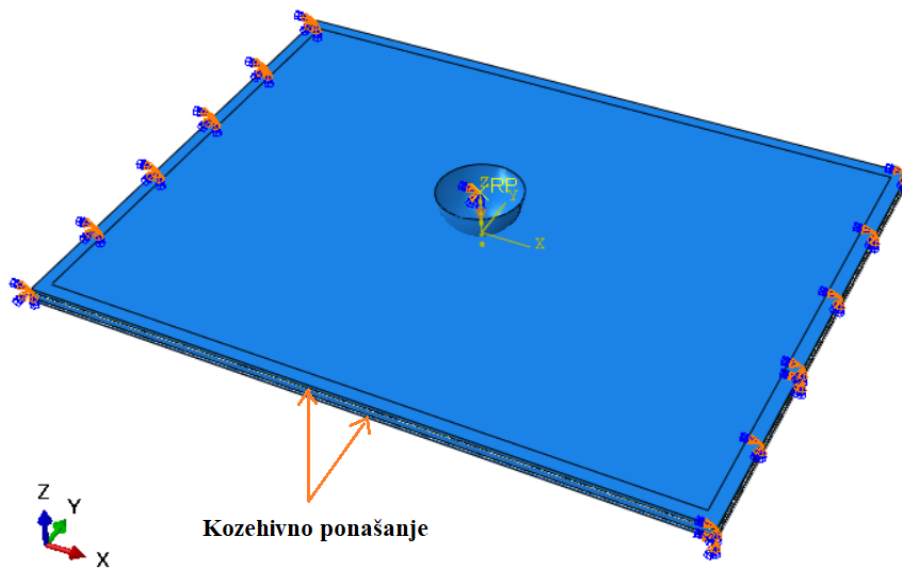
Model kompozitne ploče je dimenzija 101,6 x 76,2 mm te je duž kraćih rubova pričvršćen u uređaj. Debljina iznosi 2,276 mm i sastoji se od 8 slojeva, što znači da je svaki sloj debljine 0,2845 mm. Ploča se udara u samom središtu čeličnom polusferom radijusa 6,35 mm koja je modelirana kao analitičko kruto tijelo. Materijal kompozitne ploče je epoksidna matrica ojačana ugljičnim vlaknima, a kontakt čelične polusfere i ploče modeliran je kao *surface to surface* kontakt. U tablici 17. su dana svojstva korištena prilikom izrade modela [42].

Tablica 16. Materijalna svojstva ploče [42]

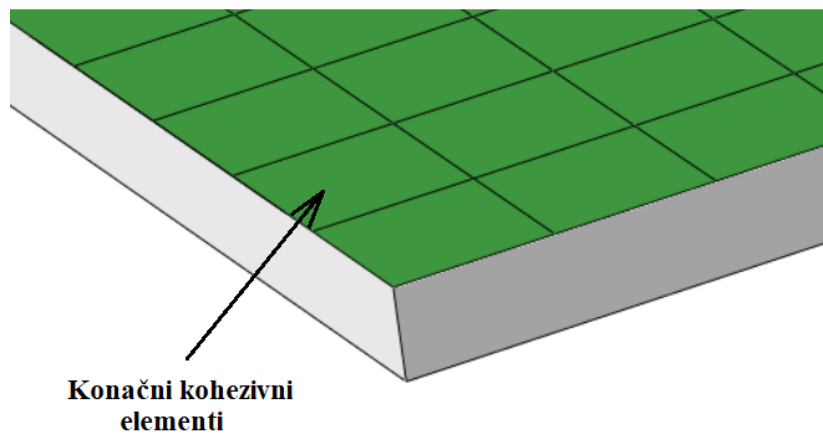
$E_1$ [MPa]	$E_2$ [MPa]	$\nu_{12}$ [-]	$G_{12}$ [MPa]	$G_{13}$ [MPa]	$G_{23}$ [MPa]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
130340	9655	0,29	5586	5586	4827	1539
$X^T$ [MPa]	$X^C$ [MPa]	$Y^T$ [MPa]	$Y^C$ [MPa]	$S$ [MPa]		
1875,374	1330,688	58,605	270,2745	99,974		

Na slici 26. prikazan je numerički model kompozitne ploče. Duž kraćih rubova postavljeno je uklještenje s obzirom da je i u eksperimentalnom testiranju duž tih rubova ploča pričvršćena u uređaj. Brzina udarača je konstantna i iznosi 3,7334 m/s u smjeru osi z. Cijeli model ploče napravljen je od tri dijela, prvi i treći dio sadrže po dva sloja orijentacije 0°, a drugi, središnji dio, sadrži četiri sloja orijentacije 90°, odnosno raspored slojeva izgleda [0<sub>2</sub>/90<sub>2</sub>]<sub>S</sub> (*cross-ply*). Na prijelazima između tih slojeva dodjeljuje se kohezivno svojstvo ponašanja pomoću konačnih kohezivnih konačnih elemenata. Na slici 27. prikazana je detalj slika na kojoj je vidljiv položaj kohezivnih elemenata koji se nalaze na gornjoj plohi trećeg dijela ploče. Isti kohezivni elementi nalaze se i na donjoj plohi prvog dijela ploče. Ukupan broj konačnih elemenata na modelu je 23256, od kojih su 7752 konačni kohezivni elementi COH3D8.





Slika 26. Numerički model ploče s naznačenim područjima kohezivnog ponašanja



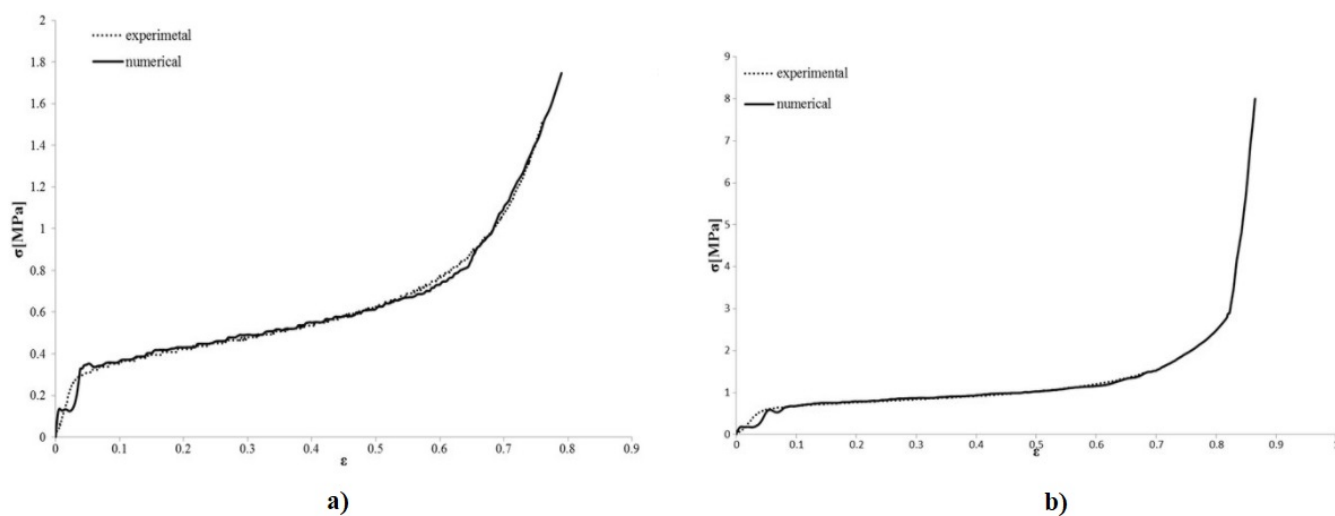
Slika 27. Položaj kohezivnih elemenata

## 6.4. Numerički model apsorpcijskog sloja

U ovom radu, apsorpcijski sloj modeliran je uz pojednostavljenja u odnosu na realni koji se koristi u motociklističkim kacigama. Prvo od pojednostavljenja je to što je sloj modeliran na način da sadrži jednaku debljinu po cijelom modelu koja iznosi 35 mm i jednoliku gustoću, bez prilagođavanja mjestu očekivanog udara. Zatim je izostavljen donji dio apsorpcijskog sloja koji štiti bradu te je u potpunosti izrađen od jednog materijala bez kombiniranja dvaju ili više kako je to u praksi moguće. Prilikom provedbi simulacija, korištena su dva materijala: ekspanzirani polipropilen te aglomerirani pluto. Referentni model, s kojim će se provoditi usporedba, sadrži apsorpcijski sloj od ekspanziranog polistirena koji je za sada najčešći materijal za izradu apsorpcijskog sloja. Za opisivanje ponašanja EPP-a korišten je materijalni model *Crushable Foam*, dok je za opisivanje ponašanja aglomeriranog pluta korišten materijalni model *Hyperfoam* uz *Mullins-ov Effect*.

### 6.4.1. *Crushable Foam*

*Crushable Foam* model namijenjen je za analizu plastičnih deformacija pjena koje se koriste kao konstrukcije za apsorpciju energije te za analizu pjenastih materijala kod kojih, nakon deformiranja, ostaju trajne deformacije. Kod opisivanja ponašanja deformabilnih pjena, razlikuju se tri područja što je vidljivo na slici 28. na kojoj su prikazane dvije krivulje naprezanje-deformacija za dva tipa EPS-a različitih gustoća.

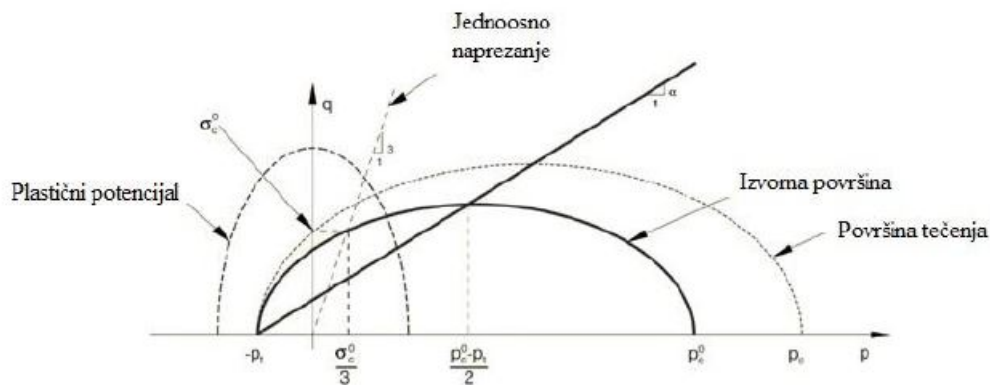


Slika 28. Dijagram naprezanje deformacija EPS-a različite gustoće: a) 65 kg/m<sup>3</sup> b) 90kg/m<sup>3</sup> [43]

Prvo područje je linearno izotropno elastično područje koje je opisano Hooke-ovim zakonom:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon. \quad (2)$$

Drugo područje je područje plastične deformacije s približno konstantnim opterećenjem i jednolikim porastom deformacije [43]. To područje plastične deformacije opisuje *Crushable Foam* model na način da je površina popuštanja von Misesov krug u ravnini devijatorskog naprežanja i elipsa u meridionalnoj ( $p$ - $q$ ) ravnini naprežanja. Točka na elipsi u meridionalnoj ravnini predstavlja hidrostatsko vlačno opterećenje i fiksna je, a razvoj površine popuštanja pokreće volumen plastičnih deformacija materijala [1]. *Crushable Foam* model prikazan je na slici 29.



Slika 29. *Crushable Foam* model s volumnim očvršćenjem [1]

Površina popuštanja za volumni model očvršćenja definirana je [1]:

$$F = \sqrt{q^2 + a^2(p - p_0)^2} - B = 0, \quad (3)$$

gdje je  $p$  tlak ili srednje normalno naprežanje:

$$p = -\frac{1}{3} \text{tr} \boldsymbol{\sigma}, \quad (4)$$

$q$  ekvivalentno naprežanje po von Misesu:

$$q = \sqrt{\frac{3}{2} \mathbf{S} : \mathbf{S}}, \quad (5)$$

**S** predstavlja devijatorsko naprezanje:

$$\mathbf{S} = \boldsymbol{\sigma} + p\mathbf{I}, \quad (6)$$

**B** iznos vertikalne  $q$  osi površine elipse:

$$B = \alpha A = \alpha \frac{P_c + P_t}{2}, \quad (7)$$

gdje je  $A$  iznos horizontalne  $p$  osi površine elipse, a  $\alpha$  predstavlja oblikovni faktor koji određuje relativnu veličinu osi.  $p_0$  središte je površine elipse:

$$p_0 = \frac{p_c - p_t}{2}, \quad (8)$$

gdje je  $p_c$  granica tečenja pri hidrostatskoj kompresiji, a  $p_t$  čvrstoća materijala u hidrostatskom vlačnom naprezanju.

Oblikovni faktor  $\alpha$  dobiva se i pomoću inicijalne granice tečenja jednoosne kompresije  $\sigma_c^0$ , inicijalne granice tečenja hidrostatske kompresije  $p_c^0$  i čvrstoće pri hidrostatskoj kompresiji  $p_t$  prema izrazu:

$$\alpha = \frac{3k}{(3k_t + k)(3 - k)}, \quad (9)$$

gdje je  $k$  omjer kompresijskih granica tečenja:

$$k = \frac{\sigma_c^0}{p_c^0}, \quad (10)$$

a  $k_t$  omjer hidrostatskih granica tečenja:

$$k_t = \frac{p_t}{p_c^0}. \quad (11)$$

Vrijednost omjera kompresijskih granica tečenja  $k$  je u intervalu  $[0,3]$ , a vrijednost omjera hidrostatskih granica tečenja  $k_t$  mora biti veća od 0.

Treće područje je područje očvršćenja materijala, odnosno kada materijal više ne može apsorbirati energiju [43].

Vrijednosti parametara korištenih za opisivanje EPP kao materijala apsorpcijskog sloja dane su u tablici 18., a preuzete su iz [44],[45].

Tablica 17. Vrijednosti parametara za EPP [44][45]

$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$E$ [MPa]	$\nu$ [-]	$k$ [-]	$k_t$ [-]
120	16	0,3	0,6	2,0

#### 6.4.2. Hyperfoam model i Mullins Effect

*Hyperfoam* je izotropni i nelinearni model materijala koji se obično koristi za karakterizaciju elastomernih pjena koje pokazuju hiperelastično ponašanje. Također je namijenjen za primjenu kod materijala kod kojih se konačni elementi mogu iznimno elastično deformirati, do 90% prilikom kompresije. U *Hyperfoam* modelu materijala, elastično ponašanje temelji se na sljedećem izrazu:

$$\tilde{U} = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} \left[ \lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3 + \frac{1}{\beta_i} (J^{\alpha_i \beta_i} - 1) \right], \quad (12)$$

gdje  $U$  energija deformiranja,  $N$  predstavlja polinom višeg stupnja,  $\lambda_i$  su glavna istežanja,  $J$  je omjer elastičnog volumena ( $J = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3$ ),  $\mu_i$  koeficijent koji definira modul smičnosti,  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$  su neintegralni eksponenti koji opisuju krivulju. Veza između glavnih istežanja  $\lambda_i$  i nominalnih deformacija  $\varepsilon_i$  dana je izrazom:

$$\lambda_i = 1 + \varepsilon_i. \quad (13)$$

Kako bi se ispravno modelirala trajna disipacija energije i ublažavanje udara s aglomeriranim plutom, uz *Hyperfoam* model koristi se i *Mullins Effect* model koji ponašanje aglomeriranog pluta prikazuje kao ponašanje izotropne elastomerne pjene. Ovaj model koristi se kod analize prisutnih oštećenja u elastomernim pjenama, kod modeliranja apsorpcije energije u komponentama pjene podvrgnutim dinamičkom opterećenju, kod slučajeva gdje je brzina deformacije znatno viša u usporedbi s brzinom relaksacije. Učinci rasipanja energije uzeti su u obzir uvodeći funkciju povećane gustoće energije deformiranja, a njen izraz glasi:

$$U(\lambda_i, \eta) = \eta \tilde{U}(\lambda_i) + \phi(\eta), \quad (14)$$

gdje  $\tilde{U}(\lambda_i)$  energetski potencijal deformacije za ponašanje pjene opisano jednadžbom (12),  $\phi(\eta)$  kontinuirana je funkcija oštećenja. Model također predviđa disipaciju energije pod čisto volumnom deformacijom. Varijabla oštećenja  $\eta$  varira s iznosom deformacije prema izrazu:

$$\eta = 1 - \frac{1}{r} \operatorname{erf} \left( \frac{U^m - \tilde{U}}{m + \beta U^m} \right), \quad (15)$$

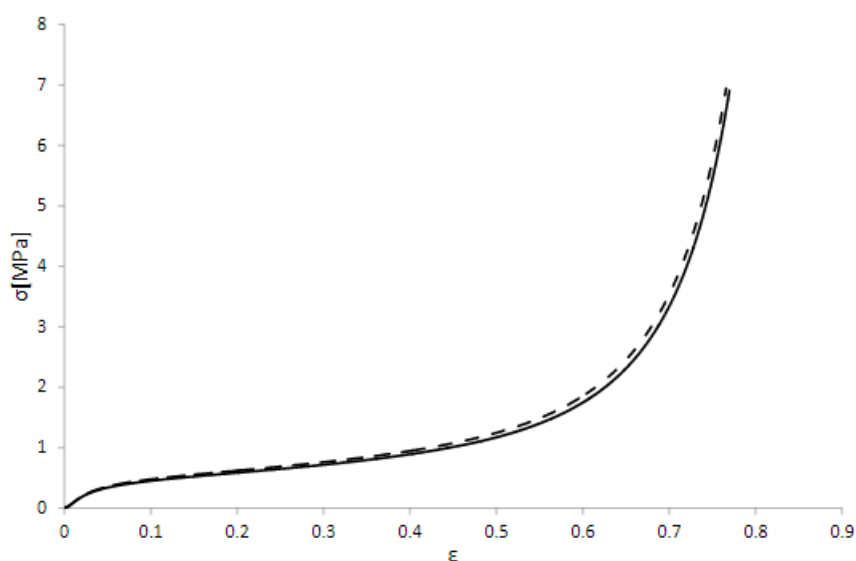
gdje je  $U^m$  maksimalna vrijednost  $U$  u određenoj točki, zatim  $r$ ,  $\beta$ ,  $m$  su materijalni parametri, a  $\operatorname{erf}(x)$  je funkcija pogreške. Parametri  $r$  i  $\beta$  su bezdimenzijski, a parametar  $m$  ima dimenziju energije [26].

Vrijednosti korištene za opisivanje aglomeriranog pluta kao apsorpcijskog sloja preuzete su iz [6] i dane su u tablici 19.

**Tablica 18. Vrijednosti parametara korištenih za *Mullins Effect* model [6]**

$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$r$ [-]	$m$ [J]	$\beta$ [-]
180	1.1	0.5	0.1

Kod definiranja *Hyperfoam* modela, za vrijednost  $N$  korišten je broj 3 uz opciju *Uniaxial Test Data*, pomoću koje nije potrebno unositi svih 9 konstanti za opis modela, već su unesene vrijednosti 17 točaka koje su očitane s grafa iz [6] (slika 30).



**Slika 30. Dijagram napreznje ( $\sigma$ ) – deformacija ( $\epsilon$ ) za aglomerirani pluto [6]**

### 6.4.3. Hashinov kriterij popuštanja

U programskom paketu *Abaqus*, kriterij nastanka oštećenja kompozita temelji se na Hashinovoju teoriji inicijacije oštećenja. Razlikuju se četiri načina popuštanja, a to su:

1. Vlačno popuštanje vlakana:

$$F_f^t = \left( \frac{\widehat{\sigma}_{11}}{X^T} \right)^2 + \alpha \left( \frac{\widehat{\tau}_{12}}{S^L} \right)^2, \quad (16)$$

2. Tlačno popuštanje vlakana:

$$F_f^c = \left( \frac{\widehat{\sigma}_{11}}{X^C} \right)^2, \quad (17)$$

3. Vlačno popuštanje matrice:

$$F_m^t = \left( \frac{\widehat{\sigma}_{22}}{Y^T} \right)^2 + \left( \frac{\widehat{\tau}_{12}}{S^L} \right)^2, \quad (18)$$

4. Tlačno popuštanje matrice:

$$F_m^c = \left( \frac{\widehat{\sigma}_{22}}{2S^T} \right)^2 + \left[ \left( \frac{Y^C}{2S^T} \right)^2 - 1 \right] \frac{\widehat{\sigma}_{22}}{Y^C} + \left( \frac{\widehat{\tau}_{12}}{S^L} \right)^2, \quad (19)$$

gdje je  $\widehat{\sigma}$  efektivni tenzor naprezanja koji određuje stanje naprezanja u kompozitu nakon pojave oštećenja:

$$\widehat{\sigma} = \mathbf{M}\sigma, \quad (20)$$

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

$$M = \begin{bmatrix} \frac{1}{(1-d_f)} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{(1-d_m)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{(1-d_s)} \end{bmatrix}, \quad (21)$$

$d_f, d_m, d_s$  su varijable oštećenja koje karakteriziraju oštećenje vlakna, matrice i smično oštećenje, a dobivaju se iz varijabli  $d_f^t, d_f^c, d_m^t, d_m^c$  na način:

$$d_f = \begin{cases} d_f^t & \text{if } \widehat{\sigma}_{11} \geq 0, \\ d_f^c & \text{if } \widehat{\sigma}_{11} < 0, \end{cases} \quad (22)$$

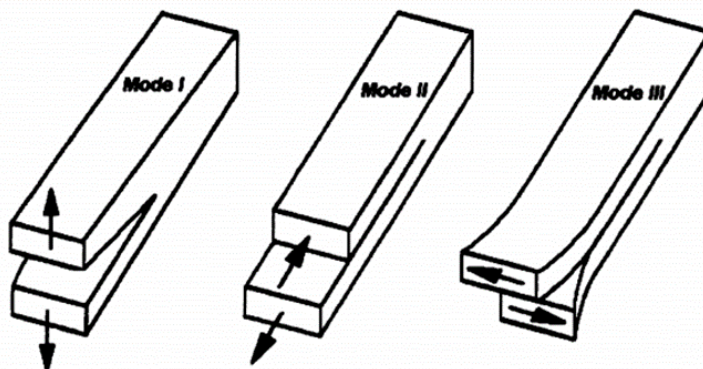
$$d_m = \begin{cases} d_m^t & \text{if } \widehat{\sigma}_{22} \geq 0, \\ d_m^c & \text{if } \widehat{\sigma}_{22} < 0, \end{cases} \quad (23)$$

$$d_s = 1 - (1 - d_f^t)(1 - d_f^c)(1 - d_m^t)(1 - d_m^c). \quad (24)$$



## 7. Delaminacije kompozitnih materijala

Kompozitni materijali imaju izrazito visoku mehaničku čvrstoću i krutost, ali su veoma osjetljivi na oštećenja kao što su delaminacije. Delaminacija ili raslojavanje je mehanizam loma koji se javlja u višeslojnim materijalima najčešće kod slojeva različitih postavnih kutova i jedan je od ključnih faktora koji razlikuje ponašanje kompozita i klasičnih metala. Do raslojavanja dolazi zbog nepravilnosti prilikom tehnologija izrade, odnosno zbog pojave izrazito visokih naprezanja među slojevima. S obzirom da vlakna ne ojačavaju sam kompozit po debljini, već samo po duljini, glavnina naprezanja u smjeru debljine kompozita pada na samu matricu koja ima slabija mehanička svojstva u odnosu na vlakna te iz tog razloga dolazi do loma [46]. Generalno govoreći, postoje tri oblika pojave delaminacija. Prvi oblik je odcjepni (eng. *opening mode/Mode I*), gdje se slojevi razdvajaju kao prilikom guljenja, drugi oblik smični unutar iste površine (eng. *in-plane shear/Mode II*) i treći oblik je smik van iste površine (eng. *Out-of-plane shear/Mode III*). Shematski prikazi oblika delaminacija prikazani su na slici 31.



Slika 31. Oblici pojave delaminacija [47]

Raslojavanje se može dogoditi na jedan način ili kao kombinacija više načina. S obzirom da kompozitni materijali znaju sadržavati i po nekoliko stotina slojeva, nekada nije jednostavno uočiti da je došlo do raslojavanja. Danas se za traženje karakterističnih značajki za svaki oblik delaminacije i opisivanje procesa koriste skenirajući elektronski mikroskopi. Poznati su detaljni opisi i karakteristike površina na kojima se dogodilo raslojavanje [47].

## 7.1. Modeliranje delaminacija u programskom paketu *Abaqus*

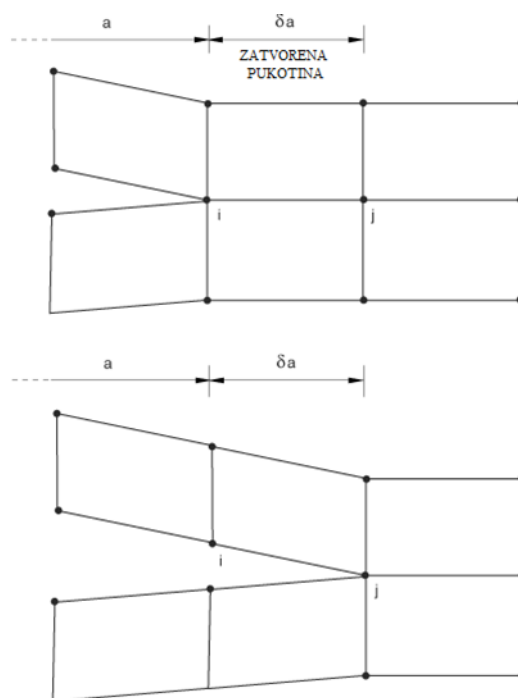
U programskom paketu *Abaqus* implementirano je 6 načina analiziranja nastajanja i propagiranja pukotina, a to su:

1. *Critical stress* kriterij
2. *Critical crack opening displacement* kriterij
3. *Crack length versus time* kriterij
4. *Virtual Crack Closure Technique (VCCT)* kriterij
5. Prošireni *VCCT* kriterij
6. *The low-cycle fatigue* kriterij

Za modeliranje potencijalnih površina gdje će nastati pukotina koriste se svojstva površinskih interakcija kroz *master-slave* formulaciju u kojoj je nužno definirati *master* površinu, *slave* površinu te skup čvorova, za koje se početno smatra da su povezani u svim smjerovima, koji će identificirati gdje se *slave* površina inicijalno veže za *master* površinu. Nužno je definirati i *master* i *slave* površinu, u protivnom će se sve površine koje imaju čvorove spojene s *master* površinom registrirati kao *slave* površine. Pretpostavka je da su potencijalne površine širenja pukotine unaprijed određene te da su na početku samo djelomično spojene kako bi *Abaqus* mogao identificirati vrhove pukotina. Ako skup čvorova gdje se vežu *master* i *slave* površine nije definiran, tada će se uvjeti kontakta primijeniti na kompletne površine što rezultira time da *Abaqus* ne može identificirati vrhove pukotine te ne može doći niti do odvajanja tih dviju površina. Također, kako bi se uopće mogla provesti analiza širenja pukotine, potrebno je aktivirati u *Step* funkciji opciju da se širenje pukotine događa između unaprijed definiranih površina koje su na početku djelomično spojene, u suprotnom se površine neće odvojiti, odnosno *Abaqus* će tumačiti kontakt površina kao trajnu vezu tijekom provedbe analize. Poznato je kako se u stvarnosti širenje pukotina ne događa samo na jedan način te je često kombinacija nekoliko načina ili širenja više pukotina istovremeno, a s obzirom da za jedan par čvorova moguće definirati samo jedan način širenja pukotine, nastoje se koristiti modeli koji su definirani za rješavanje složenijih slučajeva [41]. U nastavku će se dodatno pojasniti *VCCT* kriterij jer je i isti korišten u izradi ovog rada.

### 7.1.1. Virtual Crack Closure Technique (VCCT) kriterij

VCCT kriterij jedan je od najčešće korištenih kriterija koji se mogu koristiti u programskom paketu *Abaqus* za modeliranje delaminacija, a temeljen je na principima linearno elastične mehanike loma. Kriterij se koristi kada se analiziraju širenja pukotina, do kojih dolazi ukoliko je brzina energije deformiranja po površini jednakog iznosa kao i materijalom određena razina pukotinske žilavosti, po unaprijed definiranim putanjama i površinama. Osnovna pretpostavka VCCT metode kaže da se prilikom stvaranja pukotine oslobađa energija deformacija koja je iznosom jednaka radu potrebnom za samo zatvaranje nastale pukotine [41]. Na slici 32. prikazane su sličnosti između proširenja pukotine između čvora  $i$  i  $j$  i te samog zatvaranja pukotine.



**Slika 32. Energija deformiranja oslobođena prilikom širenja pukotine jednaka je radu potrebnom za zatvaranje pukotine [40]**

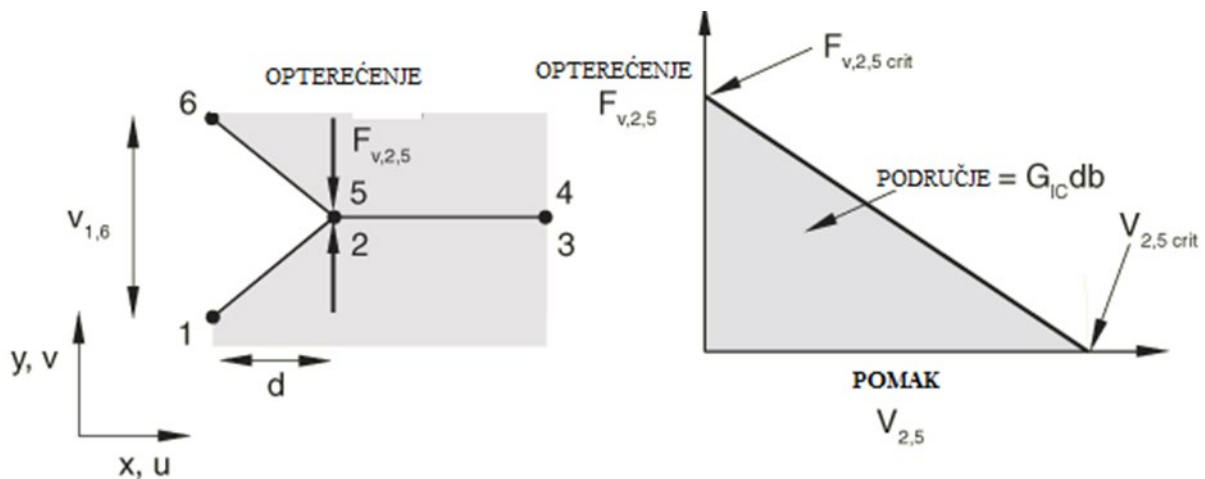
Na slici 33. lijevo prikazana je propagacija pukotine na odcjepni način (*mode I*) s naznačenim čvorovima kako bi se jasnije moglo predočiti kako *Abaqus* pristupa problemu. Vidljivo je kako se pukotina širi s lijeva na desno te su čvorovi 2 i 5 ti koji će popustiti, a do popuštanja, prema [41], dolazi kada je zadovoljeno:

$$f = \frac{G_I}{G_{IC}} = \frac{1}{2} \left( \frac{v_{1,6} F_{v,2,5}}{bd} \right) \frac{1}{G_{IC}} \geq 1, \quad (25)$$

gdje su:

- $G_I$  – brzina oslobađanja energije za *mode I*,
- $G_{IC}$  – kritična brzina oslobađanja energije za *mode I*,
- $b$  – širina,
- $d$  – duljina pukotine,
- $F_{v,2,5}$  – vertikalna sila između čvorova 2 i 5,
- $V_{1,6}$  – vertikalni pomak između čvorova 1 i 6.

Uz navedenu pretpostavku da se kriterij temelji na linearno elastičnim principima, energija potrebna za rastvaranje pukotine dobiva se iz jednadžbe (16), odnosno kada dobiveni iznos bude jednak ili veći od 1.



Slika 33. Odcjepni način širenja pukotine [41]

Generalna formula prema kojoj *Abaqus* rješava navedeni problem i za *Mode I*, *Mode II* i *Mode III* glasi:

$$f = \frac{G_{equiv}}{G_{equivC}} \geq 1, \quad (26)$$

gdje je:

$G_{equiv}$  – ekvivalentna brzina oslobađanja energije za promatrani čvor,

$G_{equivC}$  - kritična ekvivalentna brzina oslobađanja energije,

što znači da će do popuštanja u promatranom čvoru doći kada je omjer ekvivalentne brzine oslobađanja energije za čvor koji promatramo i kritične ekvivalentne brzine oslobađanja energije veći ili jednak 1.

Delaminacije se češće pojavljuju kao kombinacija navedenih oblika. Provođenjem eksperimentalnih testova dobivaju se iznosi kritičnih lomnih žilavosti materijala koji su ovisni o više parametara uz samu brzinu oslobađanja energije. Iznosi se prikazuju pomoću krivulja, a unutar *Abaqus* programskog paketa nude se tri načina računanja kritične ekvivalentne brzine oslobađanja energije  $G_{equivC}$  za slučajeve kombiniranih načina opterećenja, a to su [41]:

1. *B-K Law*,
2. *Power Law*,
3. *Reeder Law*.

#### 7.1.1.1. Benzeggag & Kenane (B-K) Law

Benzeggagh i Kenane 1996. godine opisali su model koji kritične brzine oslobađanja energije za kombinacije načina širenja pukotine svodi na jednu skalarnu vrijednost koja će vrijediti tada za sva opterećenja. BK kriterij prema [41] definiran je:

$$\frac{G_T}{G_{IC} + \left[ (G_{IIC} - G_{IC}) \frac{G_{II}}{G_T} + \left( G_{IIIC} - G_{IC} \frac{G_{III}}{G_T} \right) \right] + \left( \frac{G_{II} + G_{III}}{G_T} \right)^{\eta-1}} = 1, \quad (27)$$

gdje je:

$$G_T = G_{equiv} = G_I + G_{II} + G_{III}. \quad (28)$$

Vidljivo je kako je za ovaj kriterij potreban samo jedan materijalni parametar  $\eta$  zbog kojeg je nužno provoditi kombinirana testiranja kako bi se znao što precizniji njegov iznos za određeni materijal [41].

### 7.1.1.2. Power law

Najčešće korišten model za predviđanje širenja pukotine uslijed kombiniranog opterećenja je *Power Law* kriterij koji predstavlja interakciju među otpuštenim količinama energije prilikom propagacije pukotine. Opisao ga je *Wu* 1965. godine, a on prema [41] glasi:

$$\left(\frac{G_I}{G_{IC}}\right)^{\alpha_m} + \left(\frac{G_{II}}{G_{IIC}}\right)^{\alpha_n} = 1, \quad (29)$$

kada se uzima u obzir kombinacija prva dva načina širenja pukotine, a prema [41]:

$$\left(\frac{G_I}{G_{IC}}\right)^{\alpha_m} + \left(\frac{G_{II}}{G_{IIC}}\right)^{\alpha_n} + \left(\frac{G_{III}}{G_{IIIC}}\right)^{\alpha_o} = 1, \quad (30)$$

kada se uzima kombinacija sva tri načina širenja.

S obzirom da su za ovaj kriterij potrebna čak tri materijalna parametra, kriterij se koristi za širok raspon problema koje je potrebno riješiti.

Primjerice, kada su promatrana prva dva načina širenja pukotine, eksperimentalni rezultati provedeni na termoplastičnim (PEEK) kompozitima pokazali su da je *Power Law* prikladan za korištenje u rješavanju problema s takvim materijalima, dok su rezultati testiranja kompozita s epoksidnim matericama pokazala kako za njih ne daju ni približno dobra rješenja [41].

### 7.1.1.3. Reeder law

*Reeder Law* nešto je noviji kriterij, 2002. godine opisao ga je Reeder formulom koja, prema [41], glasi:

$$G_{equivc} = G_{IC} + (G_{IIC} - G_{IC}) \left(\frac{G_{II} + G_{III}}{G_I + G_{II} + G_{III}}\right)^\eta + (G_{IIIC} - G_{IIC}) \left(\frac{G_{III}}{G_{II} + G_{III}}\right) \left(\frac{G_{II} + G_{III}}{G_I + G_{II} + G_{III}}\right)^\eta, \quad (31)$$

gdje je:

$$G_{equivc} = G_I + G_{II} + G_{III}. \quad (32)$$

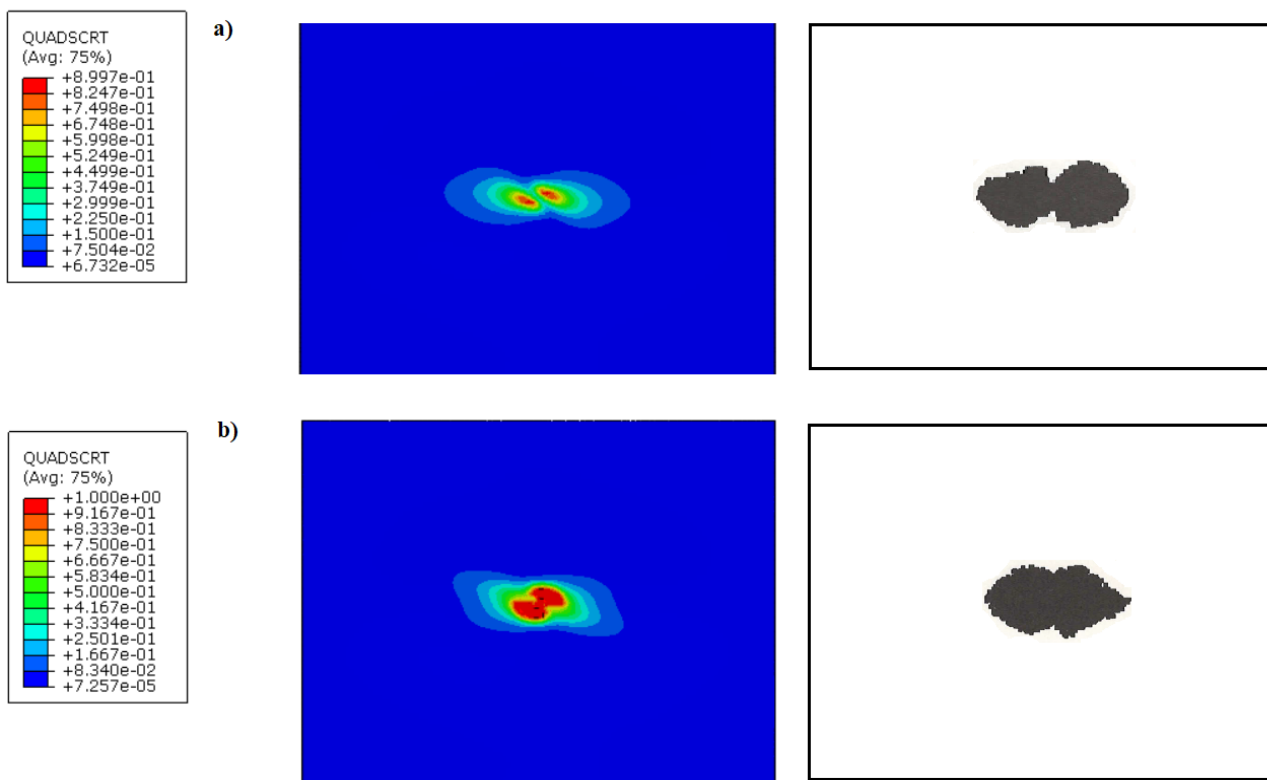
Vidljivo je da bi model bio u potpunosti definiran, potrebno je poznavati parametre  $G_{IC}$ ,  $G_{IIC}$ ,  $G_{IIIC}$  te  $\eta$ . *Reeder Law* kriterij najbolje je primjenjivati za rješavanje trodimenzionalnih problema, odnosno kada  $G_{IIC} \neq G_{IIIC}$ , u protivnom se *Reeder Law* kriterij svodi na B-K kriterij. [41].

## 8. Rezultati

U ovom poglavlju prikazani su rezultati numeričkih analiza dobivenih dvama različitim metodama modeliranja. U prvom potpoglavlju provedena je validacija modela oštećenja preko eksperimentalno dobivenih rezultata. U drugom potpoglavlju rezultati dobiveni kroz simulacije četiri navedena modela uspoređivani su s rezultatima referentnog modela iz [38]. U trećem potpoglavlju provedena je analiza kohezivnog ponašanja na spoju vanjske ljuske i apsorpcijskog sloja uz pomoć kohezivnih elemenata.

### 8.1. Validacija modela oštećenja i modeliranja delaminacija

Za potrebe validacije mehanizama kohezivnog ponašanja, modeliran je problem iz [42]. Numerički model kompozitne ploče s *cross-ply* rasporedom slojeva (opisan potpoglavljem 6.3) podvrgnut je udarnom opterećenju. Na slici 34. prikazane su QUADSCRT vrijednosti za analizirani numerički *cross-ply* model i rezultati dobiveni C-skenom provedenog eksperimenta. Prva prikazana površina nalazi se između prvog i drugog dijela modela, odnosno bliže plohi udara, a druga prikazana površina nalazi se između drugog i trećeg dijela modela, odnosno dalje od plohe udara. Vidljivo je kako na prvoj površini nije došlo do oštećenja, dok je na drugoj vrijednost QUADSCRT parametra dosegla vrijednost 1, što upućuje na pojavu i propagaciju oštećenja. U oba sloja, propagacija oštećenja dominantna je u smjeru osi  $x$ , što odgovara postavnom kutu od  $0^\circ$  uz težnju širenju po  $y$  osi. U [42] nema navedenih rezultata oštećenja vezanih za poprečni presjek, stoga ni u ovom radu isti nisu analizirani. Usporedbom numerički dobivenih rezultata i rezultata dobivenih eksperimentalnim putem, može se zaključiti kako korišteni model za opisivanje kohezivne zone daje dovoljno pouzdane rezultate.

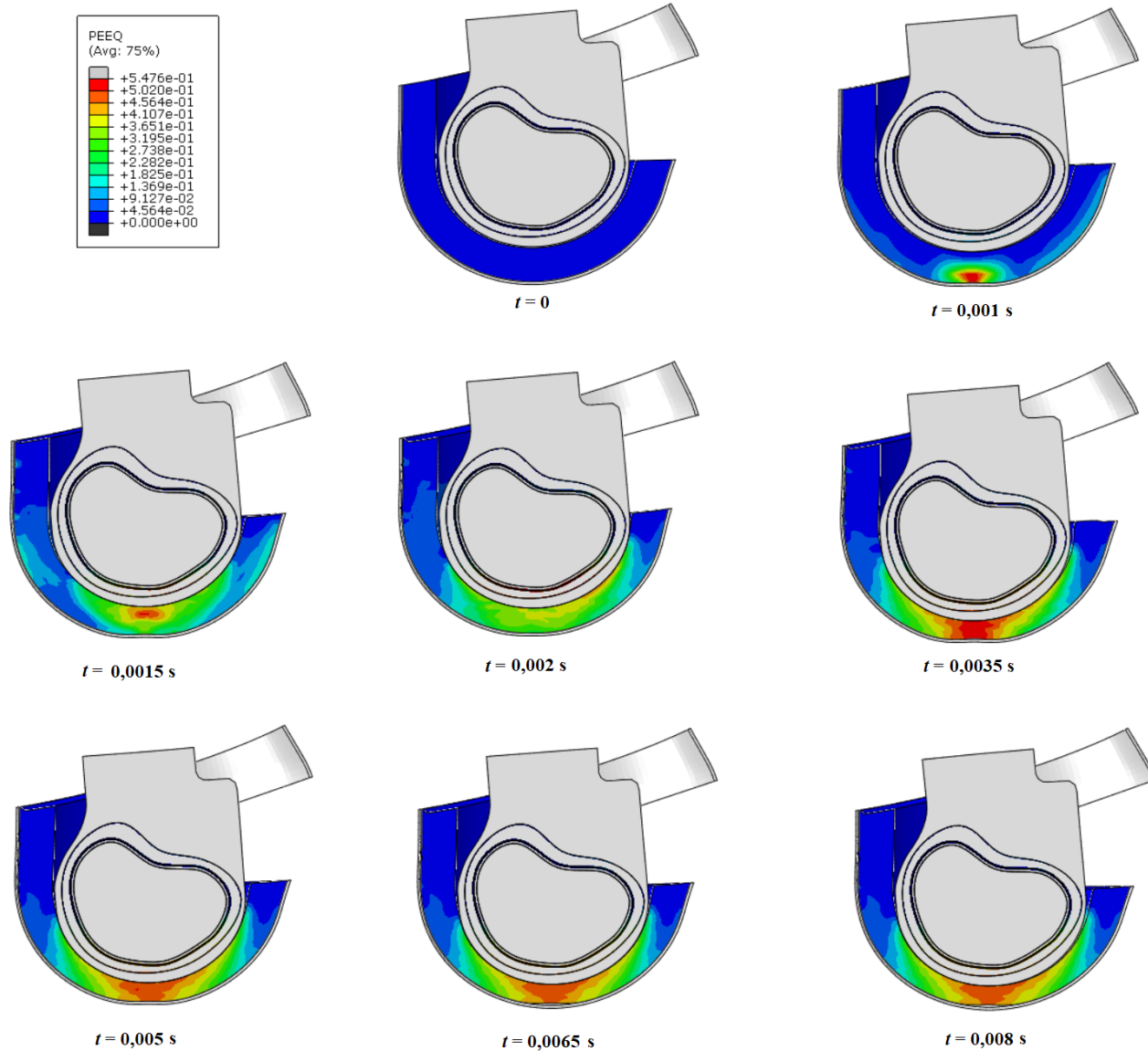


Slika 34. QUADSCRT vrijednosti a) prvi zero-thickness i odgovarajući referentni sloj b) drugi zero-thickness i odgovarajući referentni sloj

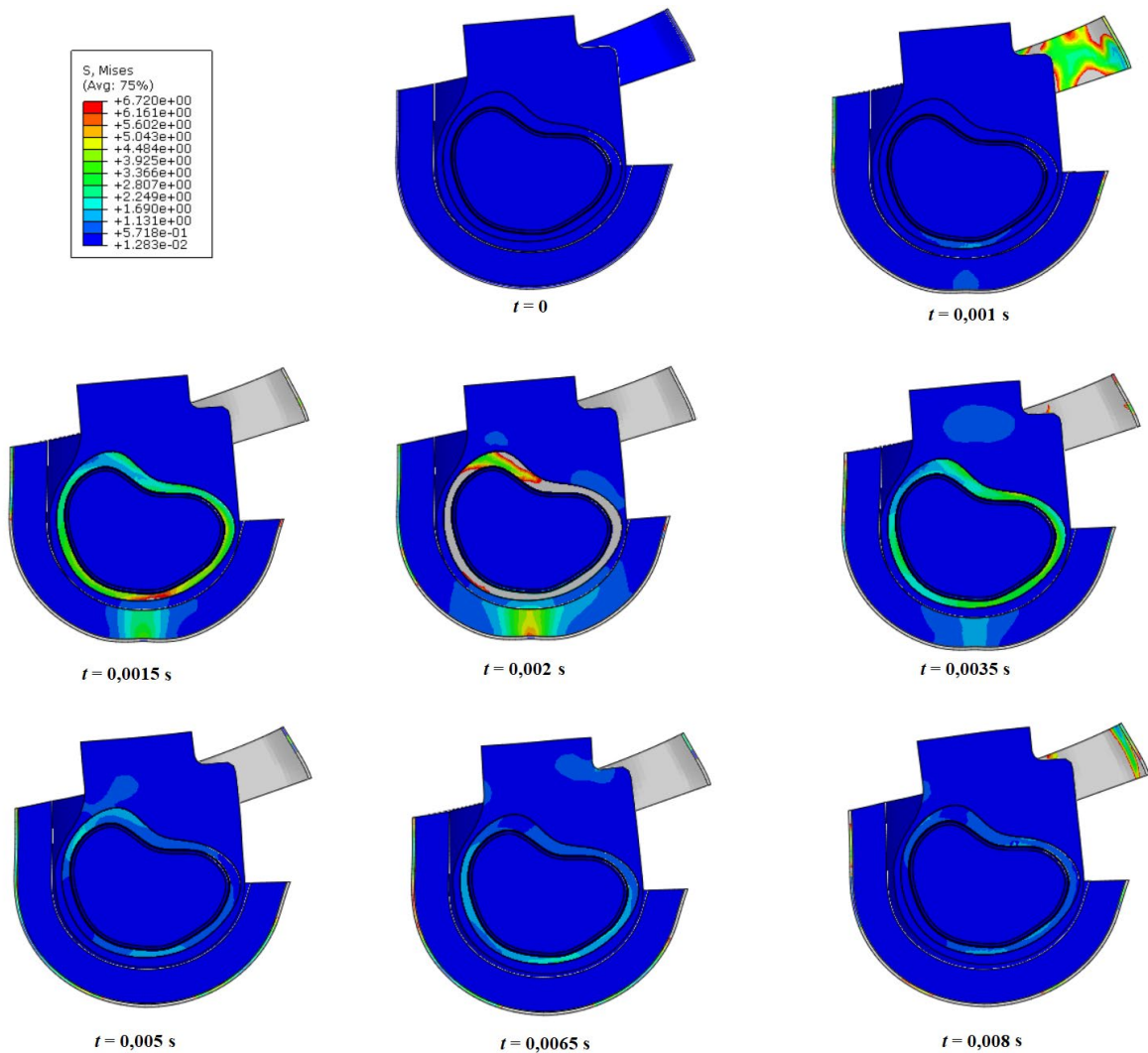
## 8.2. Numerička analiza udarca kacige u krutu podlogu

Prije početka provedbi simulacija, postavljena je maksimalna degradacija konačnih elemenata vanjske ljuske na iznos 0,8, umjesto na iznos 1 kako bi se izbjegli potencijalni numerički problemi prilikom analize. Na slici 35. prikazan je proces deformiranja kacige u određenim vremenskim intervalima koji su naznačeni na slici za kacigu s vanjskom ljuskom od epoksidne smole s ugljičnim vlaknima i apsorpcijskim slojem od EPP-a. Prikazani su rezultati PEEQ varijable koja prikazuje plastične deformacije apsorpcijskog sloja od EPP-a. Na slici 36. prikazan je isti proces deformiranja, ali za model kacige s vanjskom ljuskom od epoksidne smole s ugljičnim vlaknima i apsorpcijskim slojem od aglomeriranog pluta. Prikazani su iznosi naprezanja prema von Misesu za apsorpcijski sloj od aglomeriranog pluta.



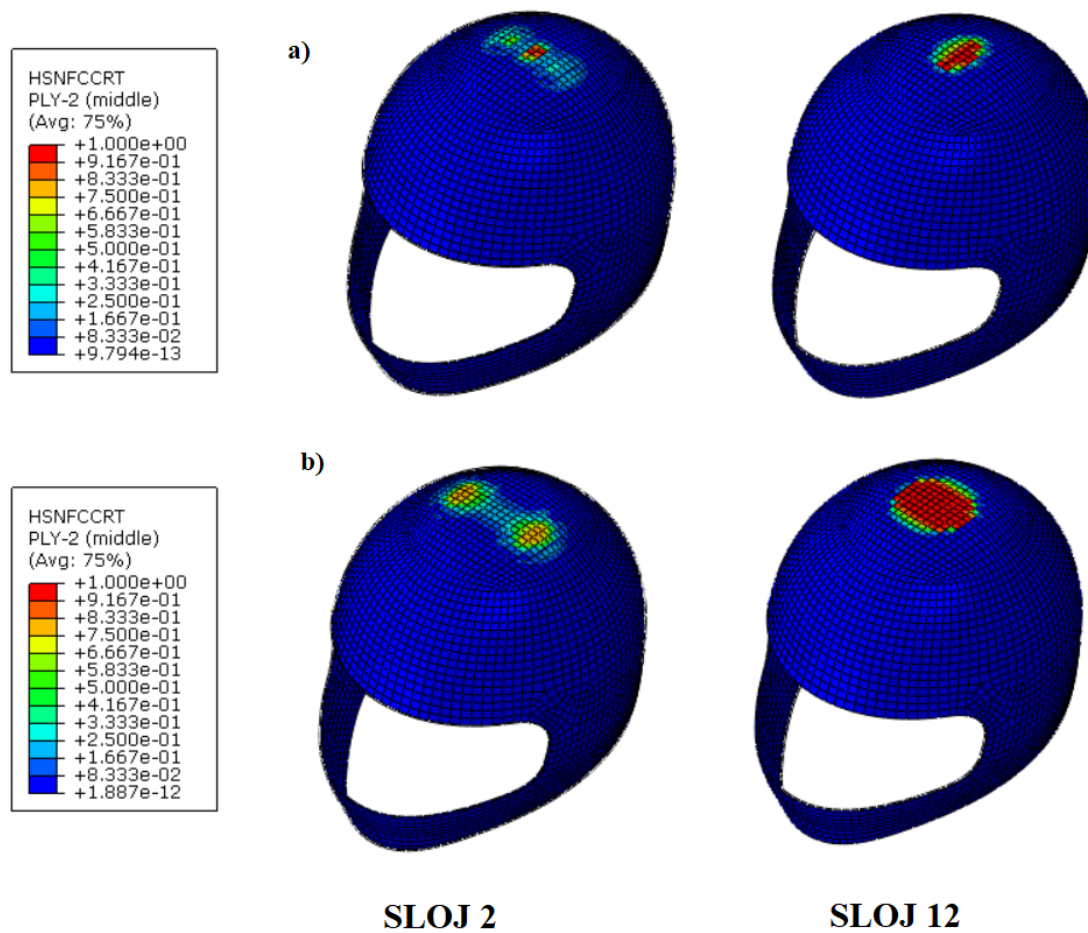


Slika 35. Prikaz deformiranja numeričkog modela kacige s ugljičnim vlaknima i EPP-om kroz vrijeme. Numerički rezultat prikazuje raspodjelu ekvivalentne plastične deformacije [-]



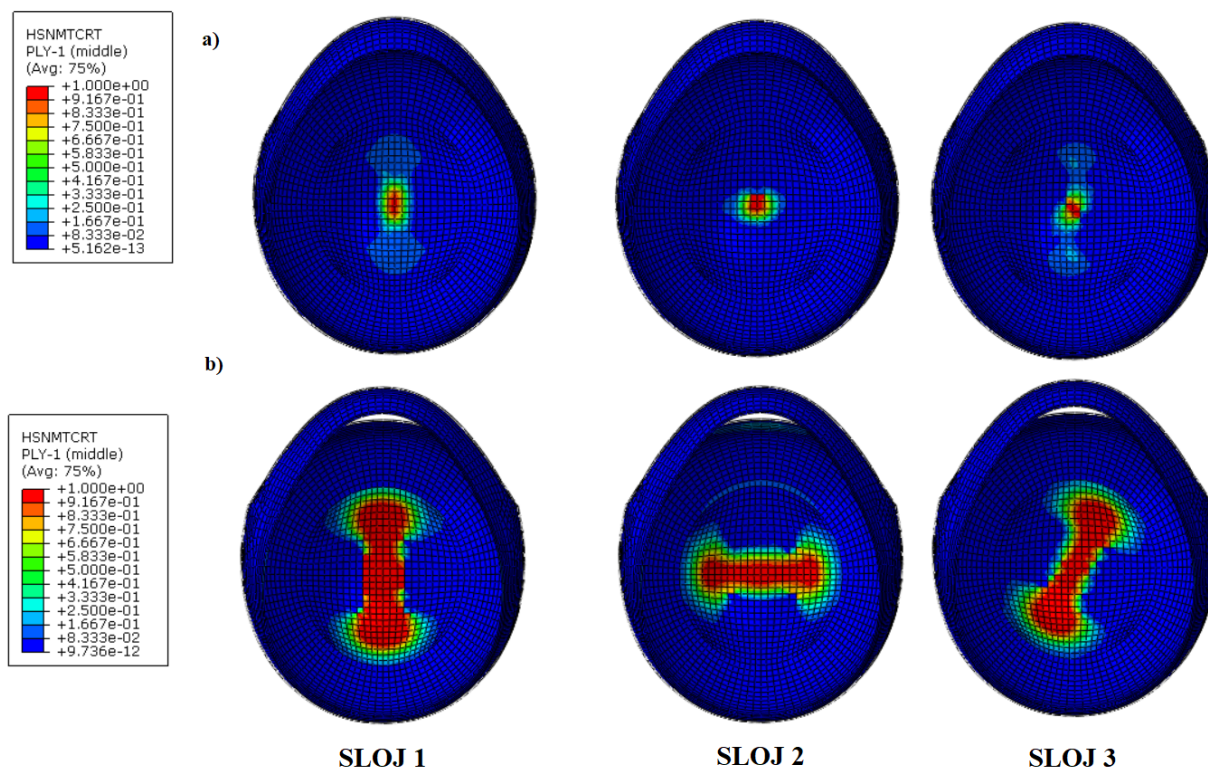
**Slika 36. Prikaz deformacije numeričkog modela kacige s ugljičnim vlaknima i plutom kroz vrijeme. Numerički rezultat prikazuje naprezanje prema von Misesu [MPa]**

Prvi kriterij usporedbe je Hashinov kriterij tlačnog popuštanja vlakana u drugom i dvanaestom sloju kompozitne ljuske. S obzirom da je za referentni model odabran interval do 3 ms, isti interval je promatran i za sva četiri modela iz rada. Razlog tome je što ne dolazi do povećanja oštećenja nakon 3 ms. Promatrani slojevi izabrani su jer oba imaju orijentaciju  $90^\circ$ . Na slici 37. prikazane su vrijednosti za Hashinov kriterij tlačnog popuštanja vlakana za referentni model vanjske ljuske s epoksidnom matricom ojačanom ugljičnim vlaknima, koji je korišten i na prvom i drugom modelu, te za model ljuske korišten u trećem i četvrtom modelu s epoksidnom matricom ojačanom staklenim vlaknima. Vidljivo je da je u oba slučaja vrijednost Hashinovog kriterija dosegla iznos 1, što znači da će u oba slučaja doći do popuštanja vlakana vanjske ljuske, ali zbog manje čvrstoće staklenih vlakana u odnosu na ugljična vlakna, popustio je znatno veći broj elemenata.



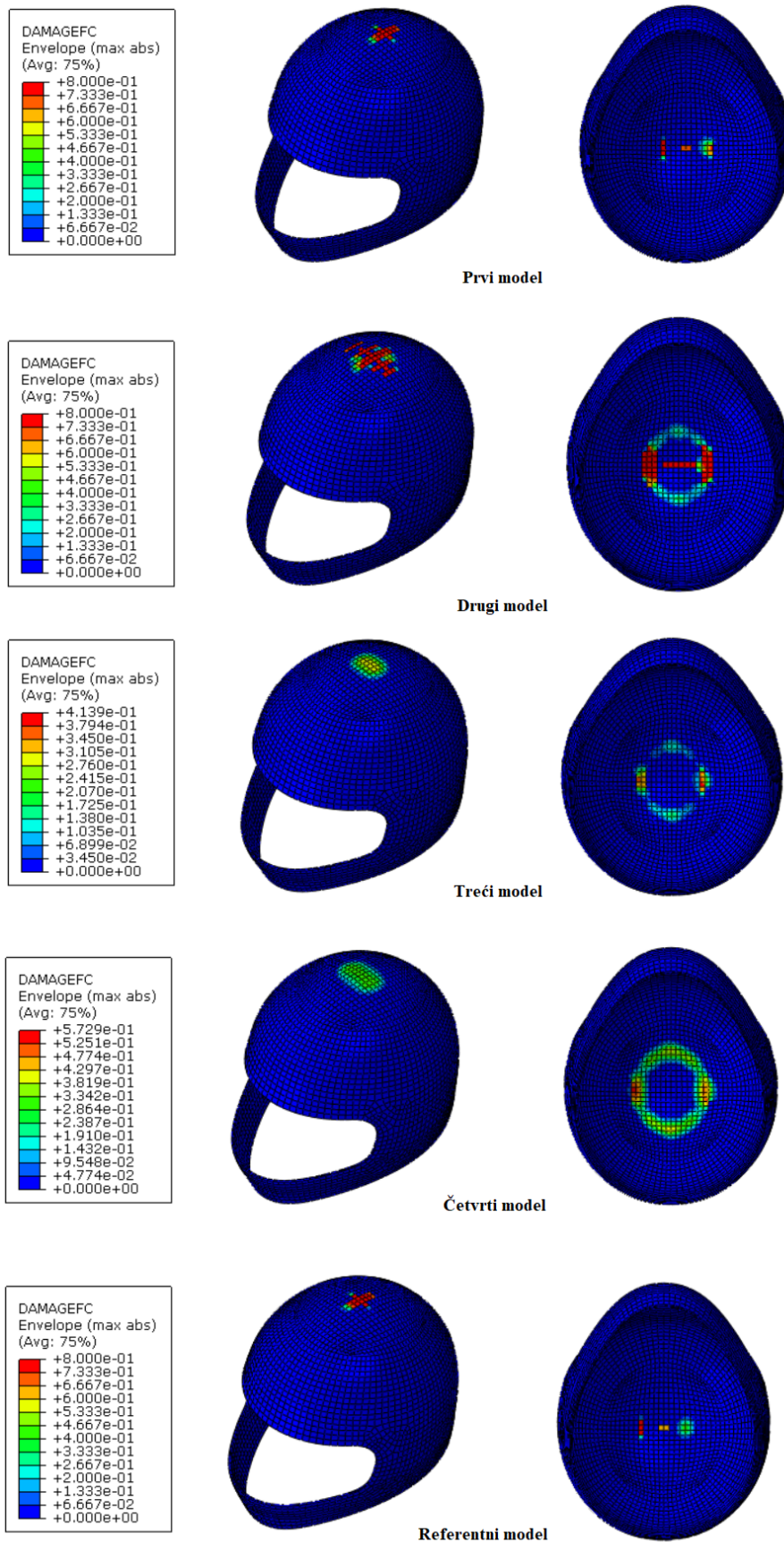
**Slika 37. Vrijednosti Hashinog kriterija tlačnog popuštanja vlakana [-] u drugom i dvanaestom sloju kompozitne ljuske za  $t = 0,003s$  a) epoksidne matrice s ugljičnim vlaknima (referentni model) b) epoksidne matrice sa staklenim vlaknima**

Pregledom Hashinog kriterija tlačnog popuštanja matrice (slika 38.) uočeno je kako je kriterij dosegno iznos 1 u prva tri sloja što znači da je došlo do popuštanja same matrice, dok je u ostalih devet iznos ispod vrijednosti 1. Prikazana su prva tri sloja, prvi sloj s orijentacijom  $0^\circ$ , drugi sloj s orijentacijom  $90^\circ$  te treći sloj s orijentacijom  $30^\circ$ . Slojevi su prikazani u trećoj milisekundi simulacije kao i u prethodnom slučaju. Prikazani su samo rezultati modela s apsorpcijskim slojem od EPP-a iz razloga što su rezultati jednaki i u slučaju s aglomeriranim plutom. Prema prikazanim rezultatima, vidljivo je da je kod drugog modela znatno veći broj elemenata dosegno kritičnu vrijednost.

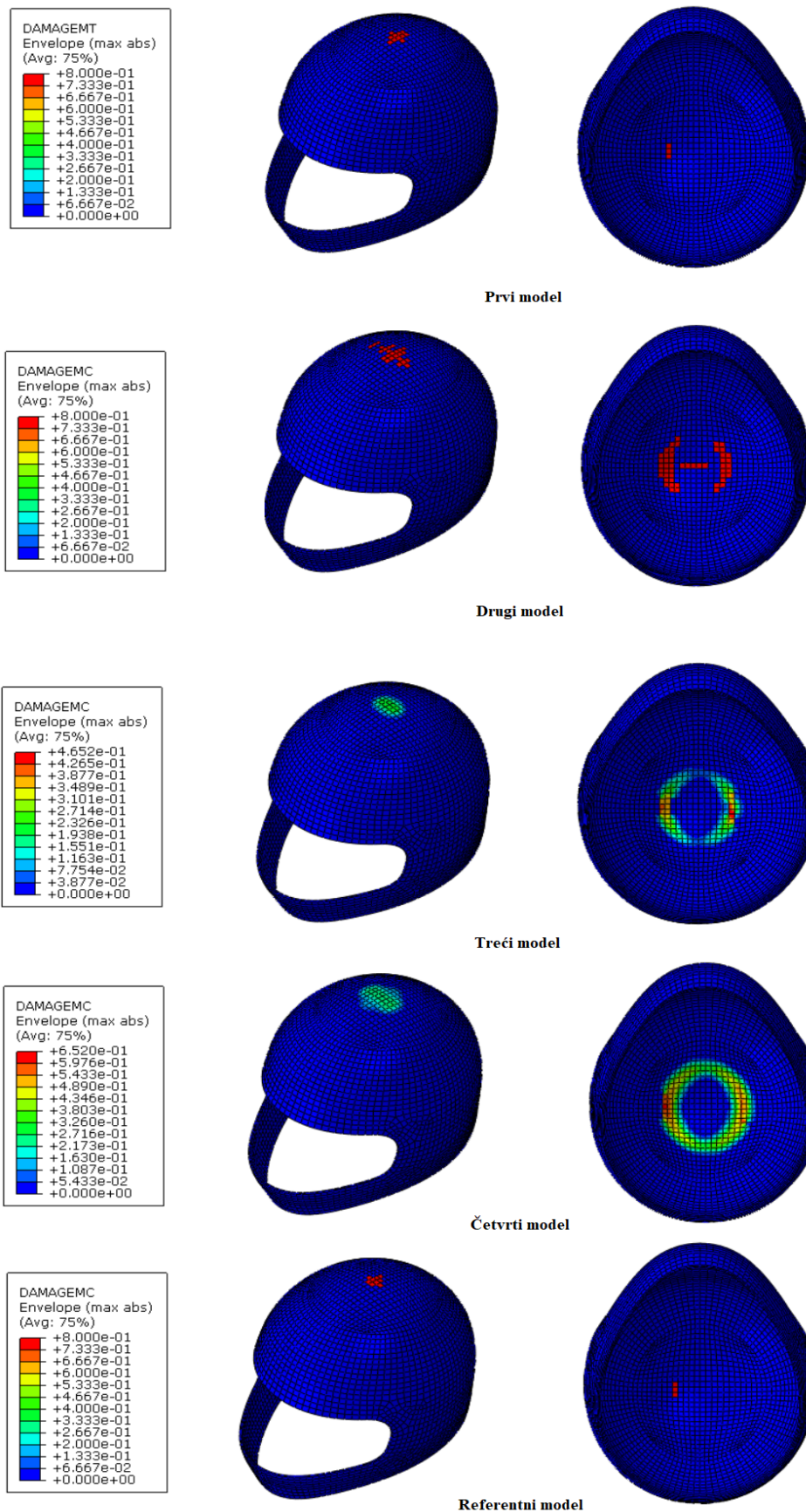


**Slika 38. Vrijednost Hashinovog kriterija tlačnog popuštanja matrice [-] za prvi, drugi i treći sloj za  $t=0,003$  s a) referentni model b) epoksidna matrica ojačana staklenim vlaknima**

Slikom 39. prikazana je vrijednost DAMAGEFC varijable koja prikazuje oštećenja vlakana uslijed tlačnog napreznja. Rezultati su prikazani u *envelope* prikazu koji omogućuje prikaz maksimalne vrijednosti iznosa neovisno o sloju. Kao što je već navedeno, vrijednost maksimalne degradacije vanjske ljuske postavljena je na iznos 0,8, što znači da je kod prvog (ugljična vlakna s EPP-om), drugog (ugljična vlakna s plutom) i referentnog modela (ugljična vlakna s EPS-om) došlo do oštećenja vlakana na prikazanim mjestima. Na slici 40. prikazana je vrijednost DAMAGEMC kriterija koja prikazuje oštećenja matrice uslijed tlačnog napreznja. Kao i kod DAMAGEFC varijable, kod prvog, drugog i referentnog modela došlo je do oštećenja matrice na prikazanim mjestima.

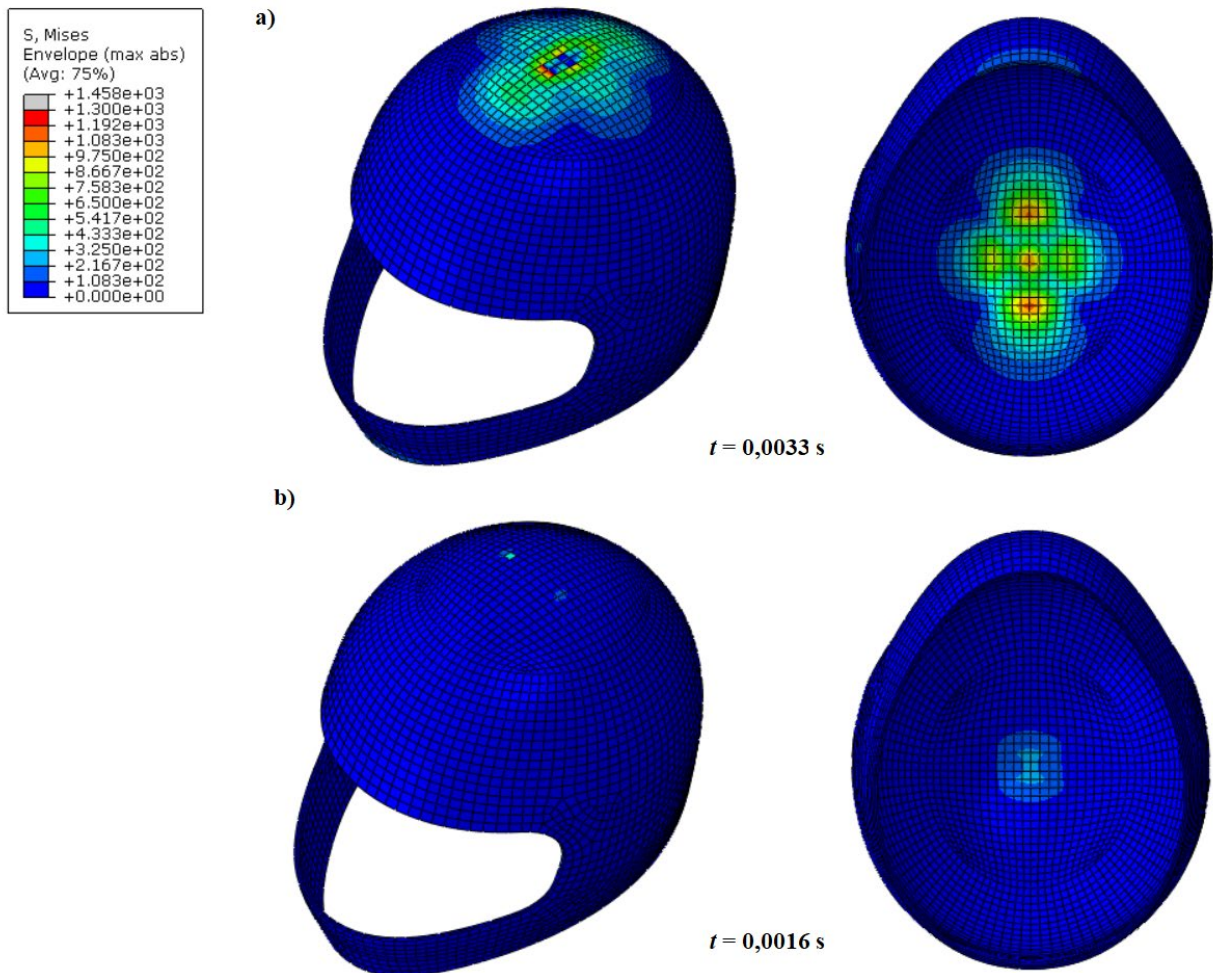


Slika 39. Vrijednost DAMAGEFC varijable [-]



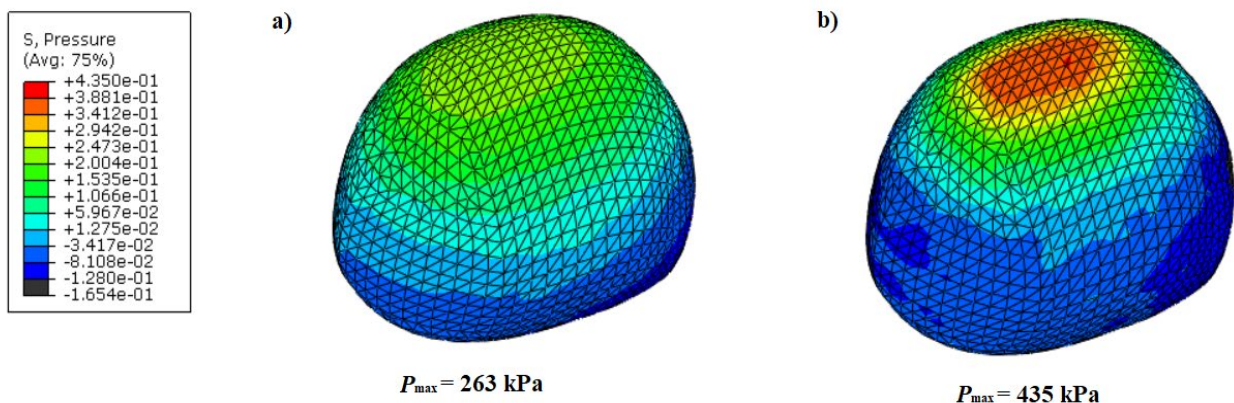
Slika 40. Vrijednost DAMAGEMC varijable [-]

Na slici 41. prikazano je ekvivalentno naprezanje prema von Misesu za ljusku ojačanu ugljičnim vlaknima i za ljusku ojačanu staklenim vlaknima s apsorpcijskim slojem od EPP-a. Rezultati su prikazani u *envelope* prikazu koji omogućuje prikaz maksimalne vrijednosti iznosa, neovisno o sloju u kojem se taj iznos pojavljuje. Za ljusku s ugljičnim vlaknima, promatrano vrijeme je 3,3 ms, a za ljusku sa staklenim vlaknima 1,6 ms iz razloga što su u tim trenucima zabilježeni najveći iznosi naprezanja. Rezultati su prikazani uz jednu mjernu skalu kako bi razlika u iznosima naprezanja bila jasnija. Vidljivo je kako je najveće naprezanje za ljusku ojačanu ugljičnim vlaknima 1458 MPa, dok je najveće naprezanje za ljusku ojačanu staklenim vlaknima 498,9 MPa. Iako je u slučaju ljuske ojačane ugljičnim vlaknima iznos maksimalnog naprezanja znatno veći, može se zamijetiti kako se radi o svega nekoliko elemenata koji postižu toliku vrijednost, stoga je realnije zaključiti kako je ta vrijednost ipak nešto manja.



Slika 41. Ekvivalentno naprezanje prema Von Misesu [MPa] a) ljuska s ugljičnim vlaknima za  $t = 0,0033$  s b) ljuska sa staklenim vlaknima za  $t = 0,0016$  s

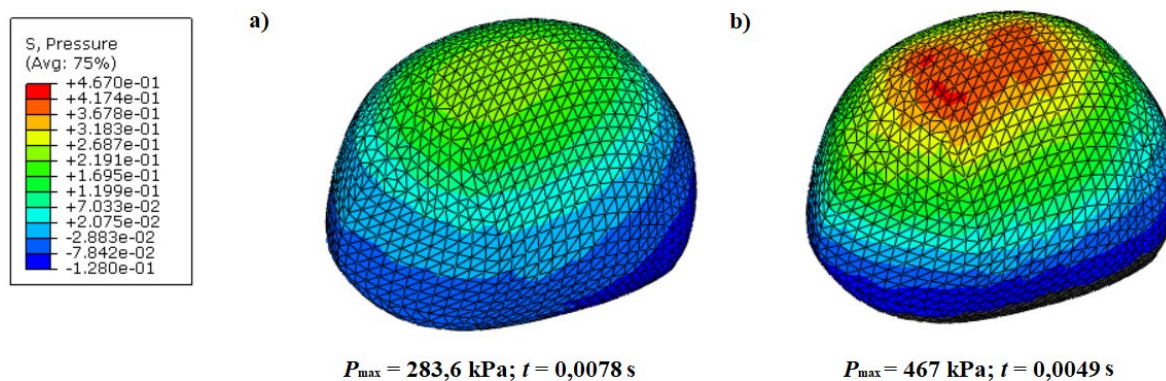
Osim materijala vanjske ljuske, varirani su i materijali apsorpcijskog sloja. Materijali koji su korišteni su ekspanzirana polipropilenska pjena te aglomerirani pluto. Za kriterij usporedbe dvaju materijala apsorpcijskog sloja uzet je maksimalni iznos tlaka koji se javlja na mozgu. Materijali su uspoređivani na način da su analizirane vrijednosti tlaka kod kaciga koje sadrže isti materijal vanjske ljuske. Granične vrijednosti tlaka, prema [6], kreću se između 90 i 256 kPa, ovisno o načinu i vrsti udara. Na slici 42. prikazana je usporedba modela kaciga koje sadrže epoksidnu smolu s ugljičnim vlaknima za materijal vanjske ljuske. Vrijednosti su prikazane u sedmoj milisekundi jer u tom trenutku oba modela dosežu maksimalne vrijednosti tlaka. Rezultati su prikazani na jednoj mjernoj skali kako bi se jasnije vidjelo koji apsorpcijski sloj uspijeva apsorbirati više energije. Maksimalna vrijednost tlaka kod prvog modela s EPP-om iznosi 263 kPa, dok dok drugog modela s aglomeriranim plutom iznosi 435 kPa. Prema ovoj usporedbi EPP se pokazao boljim izborom za materijal apsorpcijskog sloja.



**Slika 42. Vrijednosti tlaka mozga [MPa] kod modela s ugljičnim vlaknima za  $t = 0,007 \text{ s}$  a) model s EPP-om b) model s aglomeriranim plutom**

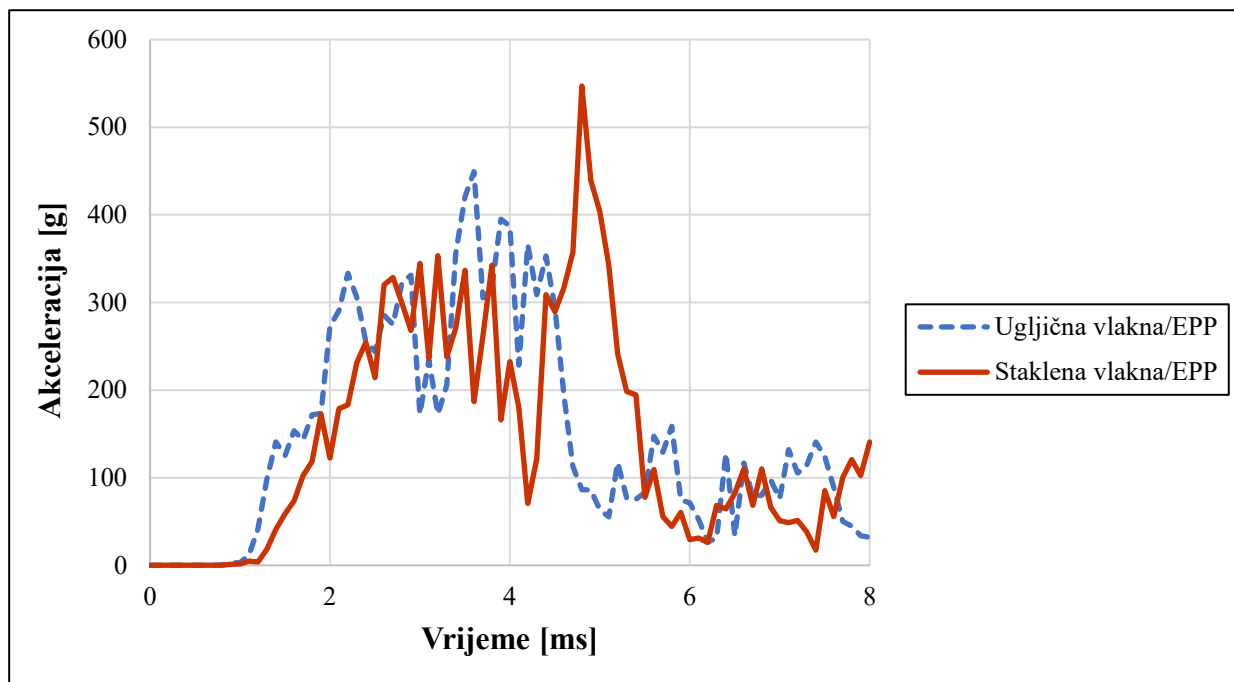
Na slici 43. prikazana je usporedba modela kaciga koje sadrže epoksidnu smolu sa staklenim vlaknima za materijal vanjske ljuske. Vrijeme u kojem su prikazani rezultati naznačeni su na slici. Maksimalna vrijednost tlaka kod modela s EPP-om iznosi 283,6 kPa u trenutku  $t = 0,0078 \text{ s}$ , dok je maksimalna vrijednost tlaka kod modela s aglomeriranim plutom 467 kPa u trenutku  $t = 0,0049 \text{ s}$ . I prema ovoj usporedbi EPP se pokazao kao bolji izbor za izradu apsorpcijskog sloja. Kod obje usporedbe provedene su simulacije gdje VCCT kriterij nije korišten kako bi se vidjelo ima li značajnijih razlika u dobivenim iznosima tlakova, ali dobivene razlike su beznačajne.





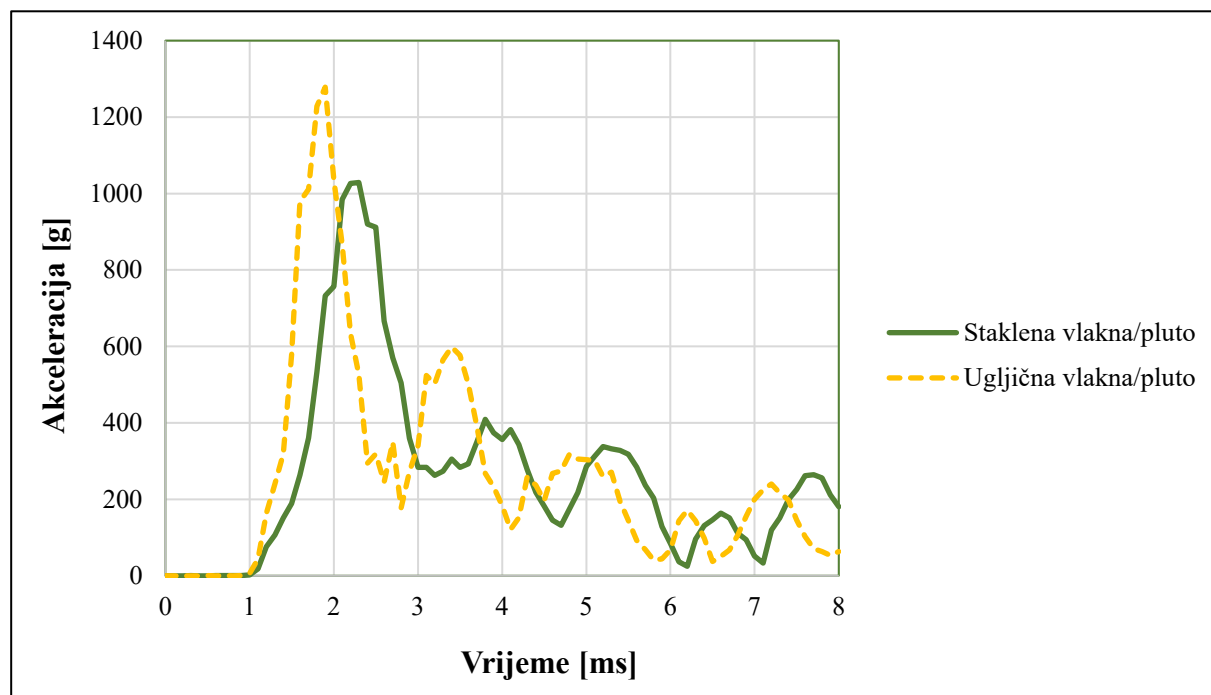
**Slika 43. Vrijednosti tlaka mozga [MPa] kod modela sa staklenim vlaknima a) model s EPP-om b) model s aglomeriranim plutom**

Dalje u tekstu, sve četiri kombinacije materijala i referentni model su uspoređeni tako da je prvo mjerena akceleracija u čvoru koji se nalazi najbliže samom centru mase modela (čvor 257, lubanja). Zbog bolje preglednosti, prvo su uspoređivani modeli koji sadrže EPP kao materijal apsorpcijskog sloja, zatim modeli koji sadrže pluto. Potom su dijagrami s najnižim i najvišim vrijednostima uspoređivani s referentnim modelom. Na slici 44. prikazan je dijagram akceleracija modela s ugljičnim vlaknima (plava krivulja) te staklenim vlaknima (crvena krivulja) u kombinaciji s EPP-om u čvoru 257 na modelu lubanje. Maksimalni iznos akceleracije koji se postiže za model s ugljičnim vlaknima iznosi 450 g, dok se kod modela sa staklenim vlaknima postiže iznos 547 g.



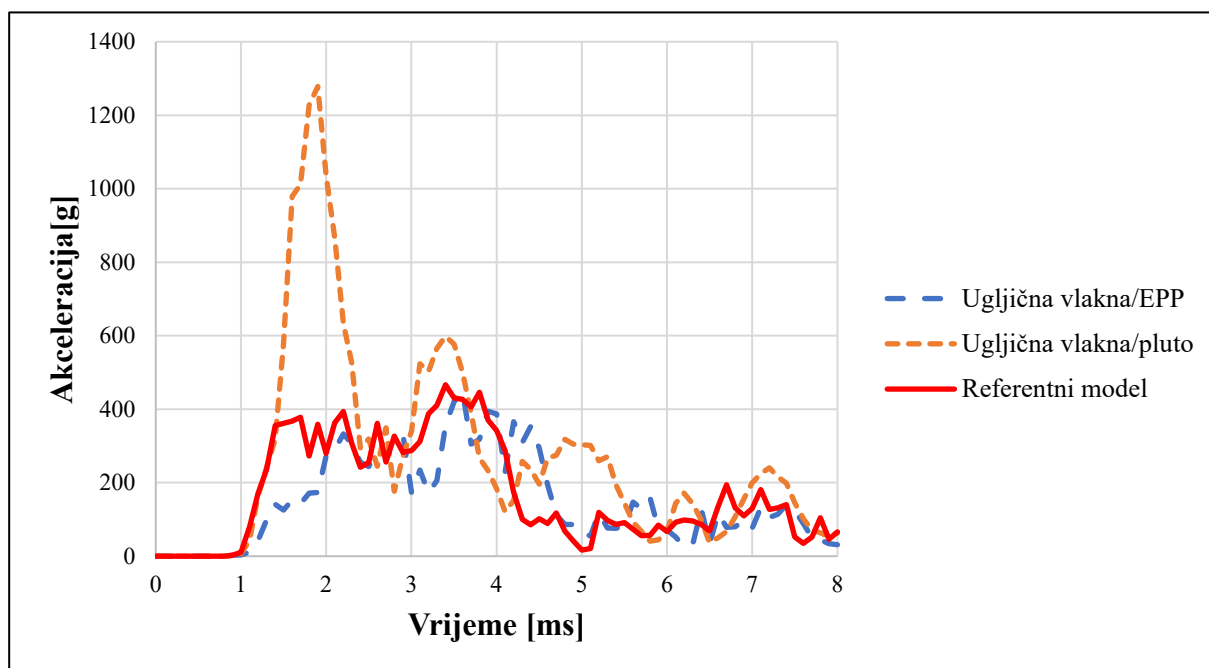
**Slika 44. Dijagram akceleracija s EPP-om kao materijalom apsorpcijskog sloja**

Na slici 45. prikazan je dijagram akceleracija modela s ugljičnim vlaknima (narančasta linija) te modela sa staklenim vlaknima (zeleno linija) u kombinaciji s plutom u čvoru 257 na modelu lubanje. Maksimalni postignuti iznos akceleracije kod modela s ugljičnim vlaknima iznosi 1278 g, dok je kod modela sa staklenim vlaknima maksimalni iznos 1029 g.



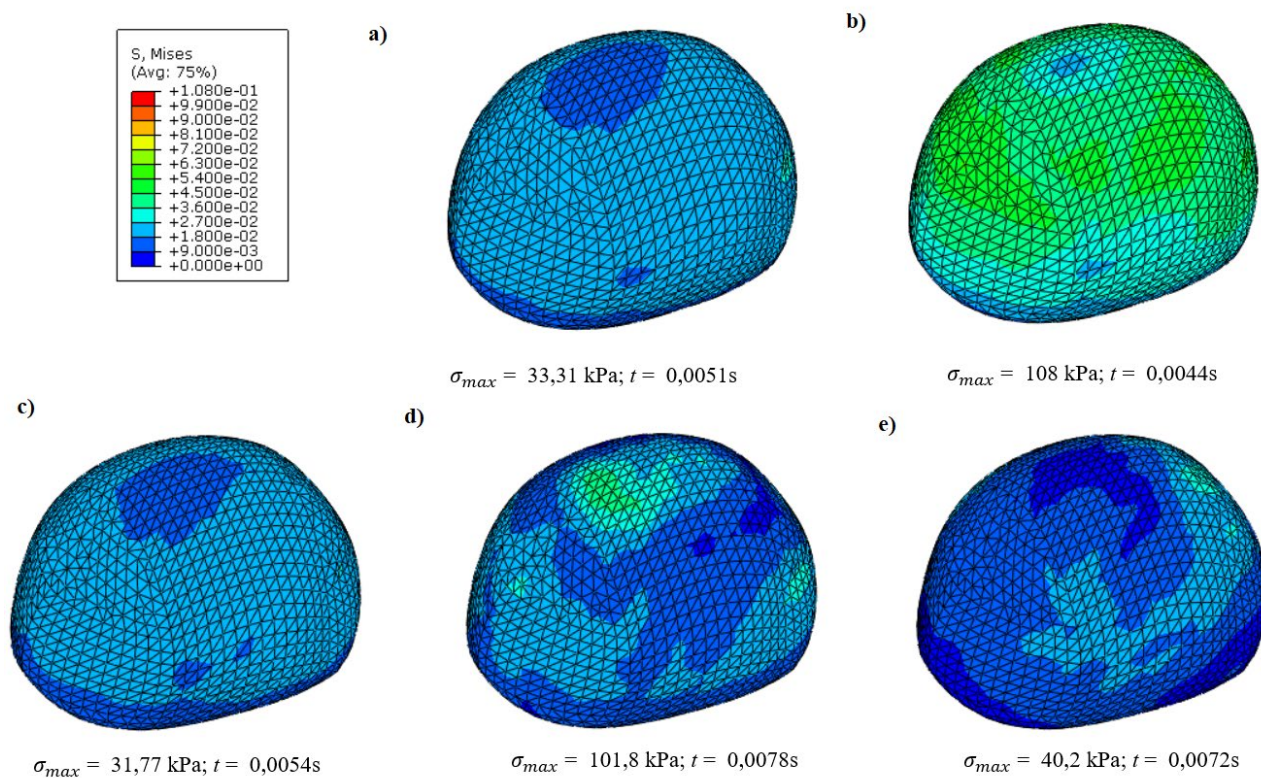
Slika 45. Dijagram akceleracija s plutom kao materijalom apsorpcijskog sloja

Jasno je kako se najmanji iznos akceleracije javlja kod modela koji za materijal vanjske ljuske ima epoksidnu smolu s ugljičnim vlaknima s EPP-om kao materijalom apsorpcijskog sloja, a najveći iznos javlja se kod modela koji ima kombinaciju materijala epoksidna smola sa ugljičnim vlaknima i pluto. Na slici 46. prikazan je dijagram u kojem su uspoređeni dijagrami s najvećim iznosom akceleracije i najmanjim iznosom akceleracije s referentnim modelom iz [37]. Maksimalni iznos akceleracije referentnog modela iznosi 467 g. Svi dobiveni iznosi premašuju dopuštenu granicu propisanu ECE R22.05 standardnom koji iznosi 275 g. Spuštanje dobivenih iznosa ispod propisane granične vrijednosti ne bi garantiralo prolazak testiranja s obzirom da je u ovom radu simuliran udarac samo u točku P (slika 11.). Značajni utjecaj na iznose akceleracija zasigurno imaju i uvedena pojednostavljenja u numerički model, poput toga što je korišten jednoliki poprečni presjek apsorpcijskog sloja koji u stvarnosti ima dodatna zadebljanja materijala na očekivanim mjestima udara što zasigurno smanjuje iznose akceleracija prilikom udara.



Slika 46. Dijagram akceleracija s najvišim, najnižim i referentnim iznosima

Kako bi se procijenio rizik od ozljede, analizirano je naprezanje mozga prema von Misesu. Kod promatranja naprezanja prema von Misesu, dopušteni intervali se također razlikuju prema mogućim vrstama ozljeda, a i trajanju izloženosti naprezanju. Razni su izvori o graničnim iznosima, ali prema [6] uzet je interval između 10 i 46 kPa. Na slici 47. prikazani su iznosi vrijednosti naprezanja prema Von Misesu za sva četiri modela te za referentni. Rezultati su prikazani uz jednu mjernu skalu kako bi se jasnije vidjele razlike u postignutim vrijednostima naprezanja. Iznosi maksimalnih naprezanja su za prvi model 33,31 kPa, za drugi model 108 kPa, za treći model 31,77 kPa i za četvrti model 101,8 kPa. Za referentni model vrijednost maksimalnog naprezanja iznosi 40,2 kPa. Uz navedene maksimalne vrijednosti naprezanja navedeni su i vremenski periodi u kojem se to naprezanje javlja. Prema dobivenim rezultatima, može se zaključiti kako u drugom i četvrtom slučaju postoji izniman rizik od traumatskih povreda mozga.

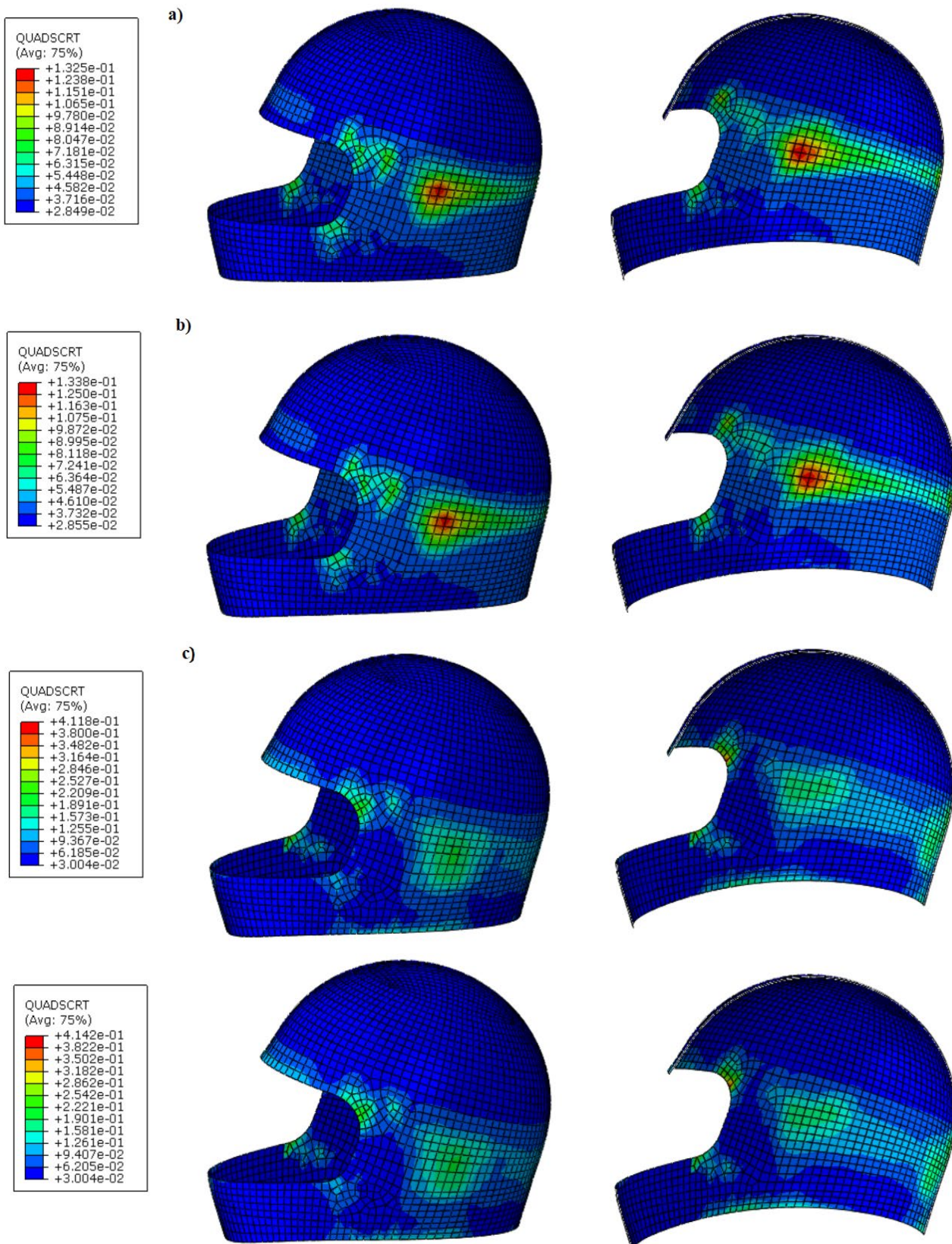


**Slika 47. Naprezanje prema von Misesu [MPa] a) prvi model b) drugi model c) treći model d) četvrti model e) referentni model**

Kod analiziranja rezultata, treba uzeti u obzir kako je modeliran samo veliki mozak i ovojnica *dura mater*. Ostale ovojnice bi još dodatno ublažile naprezanje te bi trebalo razmotriti na koji način bi modeliranje malog mozga i moždanog debla utjecalo na rezultate.

### 8.3. Numerička analiza delaminacija pomoću kohezivnih elemenata

Nakon provedene validacije u poglavlju 8.1. korišteni su isti mehanizmi opisivanja kohezivnog ponašanja na modelu vanjske ljuske kacige. Promatrano je kohezivno ponašanje na spoju vanjske ljuske i apsorpcijskog sloja. Na slici 48. prikazani su rezultati QUADSCRT varijable, koja opisuje inicijaciju oštećenja na modelima s kohezivnim elementima, za *zero-thickness* slojeve sva četiri numerička modela. Prikazane su vanjske ljuske iz bočnog pogleda te u presjeku kako bi se mogla vidjeti i gornja i donja ploha. Iz slike 48. može se zaključiti kako ni u jednom promatranom modelu vrijednost varijable QUADSCRT nije dosegla iznos 1, što znači da ne bi došlo do inicijacije oštećenja na promatranom mjestu. Smjerovi protezanja inicijacije potencijalnog oštećenja protežu se pretežito u smjeru  $y$  osi i u sva četiri modela teže ka istom obliku što je vjerojatno posljedica smjera vlakana, s obzirom da iako je numerički model vanjske ljuske modeliran od više dijelova (slika 21) svi dijelovi imaju prvi sloj orijentacije  $0^\circ$ . Iz rezultata je vidljivo kako se na gornjoj i donjoj plohi javljaju iste inicijacije oštećenja, ali različitih orijentacija.



Slika 48. QUADSCRT vrijednosti [-] a) prvi model b) drugi model c) treći model d) četvrti model

## 9. Zaključak

Za provedene numeričke simulacije korišten je numerički model glave iz [37] koji je rađen po SUFEM numeričkom modelu uz značajna pojednostavljenja. Simuliran je udarac numeričkog modela kacige i glave o krutu podlogu u svrhu procjene bi li promatrani materijali zadovoljili uvjete postavljene standardom. Materijalna svojstva preuzeta su iz navedene literature. Varirana su dva materijala vanjske ljuske te dva materijala apsorpcijskog sloja u svrhu usporedbe dobivenih rezultata s referentnim modelom iz [38]. Rubni uvjeti i iznos brzine udara preuzeti su iz standarda ECE R22.05.

U prvom dijelu rada, analiziran je Hashinov kriterij tlačnog popuštanja vlakna te Hashinov kriterij tlačnog popuštanja matrice koji su pokazali kako će doći do oštećenja i vlakana i matrice kod oba materijala vanjske ljuske, ali kod modela s epoksidnom smolom ojačanom staklenim vlaknima oštećenje je izraženije, odnosno do popuštanja je došlo u znatno većem broju konačnih elemenata zbog manje čvrstoće samog materijala. Prema analiziranju ovih dvaju kriterija, epoksidna smola s ugljičnim vlaknima kao materijal vanjske ljuske pokazao se kao bolji izbor za izradu.

Kao drugi kriterij analizirana su naprezanja prema von Misesu. Rezultati su prikazani u *envelope* prikazu u trenutku simulacije u kojem model doživi najveći iznos naprezanja. Maksimalni iznos naprezanja zabilježen kod ljuske s ugljičnim vlaknima iznosi 1458 MPa, dok kod ljuske sa staklenim vlaknima iznosi 498,9 MPa.

Treći kriterij usporedbe bila je akceleracija u čvoru koji se nalazi najbliže centru mase (čvor 257, lubanja). Najveći iznos akceleracije očitao je kod drugog modela (ugljična vlakna/pluto), dok je najmanji iznos akceleracije očitao kod prvog modela (ugljična vlakna/EPP). U usporedbi s referentnim modelom kod kojeg je najveći iznos akceleracije 467g, kod prvog modela zabilježen je manji iznos, 450 g, što čini kombinaciju materijala korištenu u prvom modelu boljom opcijom od kombinacije materijala kod referentnog modela (ugljična vlakna/EPS).

Četvrti kriterij bio je usporedba tlaka i naprezanja samog mozga, s obzirom da je i primarna zadaća motociklističkih kaciga zaštita glave i mozga. Kod tlaka, promatrani su dominantni rezultati koji se pojavljuju na modelu s obzirom da se, prema [6], zanemaruje vrijednost dobivena u točkama direktnog dodira mozga s ostalim dijelovima glave. Najmanje vrijednosti očitane su kod drugog modela, a najveće kod trećeg modela. Dobivene vrijednosti sva četiri modela nalaze se unutar graničnih vrijednosti tlaka, koje iznose između 90 i 256 kPa, što znači

kako prema ovim simulacijama ne bi došlo do značajnijih povreda mozga uzrokovanih tlakom. Kod analiziranja naprezanja prema von Misesu, postoje razni izvori graničnih vrijednosti, ali za potrebe ovog rada uzet je interval između 10 i 46 kPa [6]. Dobiveni rezultati pokazali su kako kod modela koji ima pluto kao apsorpcijski sloj (drugi i četvrti model) postoji izniman rizik od traumatskih povreda mozga.

Na kraju provedena je analiza kohezivnog ponašanja spoja vanjske ljuske s apsorpcijskim slojem pomoću konačnih kohezivnih elemenata. Prvo je provedena validacija samog mehanizma ponašanja na način da je simuliran jedan od problema iz [47]. Dobiveni rezultati dovoljno dobro opisuju rezultate dobivene eksperimentalnim putem, stoga je isti korišten i na samom modelu kacige. Rezultati QUADSCRT varijable ni kod jednog modela nije dosegla vrijednost 1, što znači da ne bi došlo do inicijacije oštećenja na promatranom spoju vanjske ljuske i apsorpcijskog sloja.

Iz dobivenih rezultata može se zaključiti kako je epoksidna smola s ugljičnim vlaknima bolji izbor za materijal vanjske ljuske kacige, te EPP kao materijal apsorpcijskog sloja. Epoksidna smola sa staklenim vlaknima pokazala je slabije rezultate, ali je cjenovno znatno prihvatljivija. Aglomerirani pluto nikako ne bi trebalo odbaciti kao moguću zamjenu za sintetičke materijale apsorpcijskog sloja jer pokazuje neke dobre značajke, a i u prilog tome ide i to što se sve više istraživanja provodi baš na tu temu.

Treba uzeti u obzir kako je numerički model glave i numerički model kacige modeliran s znatnim pojednostavljenjima što direktno utječe na same rezultate. U ovom radu provedena je simulacija udara samo u točku P, dok standard ECE 22.05 propisuje 5 točki udara, te je proveden samo jedan udar, a neki od navedenih standarada propisuju test višestrukih udara. Apsorpcijski sloj modeliran je tako da sadrži jednoliku debljinu i gustoću i jedan materijal, dok se u realnosti izrađuje tako da se na očekivanim mjestima udara postavi dodatni materijal veće gustoće ili kao kombinacija više materijala. Također je i modelu vanjske ljuske pridružen u svakoj simulaciji samo je da materijal, što u stvarnosti je sve rjeđi slučaj, odnosno kombiniraju se materijali kako bi performanse kacige bile što bolje. Modeliran je samo veliki mozak, uz odsustvo malog mozga, moždanog debla i dviju moždanih ovojnica. Sva navedena pojednostavljenja imaju značajan utjecaj na rezultate te je potrebno posvetiti više značaja prilikom modeliranja numeričkog modela glave i same kacige kako bi se dobili što vjerodostojniji rezultati.



## LITERATURA

- [1] Fabio A.O. Fernandes, Ricardo J. Alves de Sousa, Mariusz Ptak, Goncalo Migueis, *Helmet Design Based on the Optimization of Biocomposite Energy-Absorbing Liners under Multi-Impact Loading*, Accident Analysis and Prevention: Experimental & Numerical Approaches, 2019.
- [2] *What is my helmet made of*; <https://www.bikebiz.com.au/blog/articles/what-is-my-helmet-made-of> (18.10.2021.)
- [3] *History of helmet*; <http://www.historyofarmor.com/armor-history/history-of-helmet/> (18.10.2021.)
- [4] H. Cairns, *Head Injuries in Motor-cyclist. The Importance of the Crash Helmet*, Br. Med J., 1941. br. 2(4213), str. 465. – 471.
- [5] *Sir Hugh Cairns and the origins of the motorcycle helmet*; <https://www.rcseng.ac.uk/library-and-publications/library/blog/sir-hugh-cairns-and-the-origins-of-the-motorcycle-helmet/> (18.10.2021.)
- [6] Fabio Antonio Oliveira Fernandes, doktorski rad, *Biomechanical analysis of helmeted head impacts: novel materials and geometries*, Sveučilište u Aveiru, 2017.
- [7] *Every Rider's Guide To The Different Types of Helmets*; <https://www.studds.com/blog/every-riders-guide-to-the-different-types-of-helmets> (22.10.2021.)
- [8] *Motorcycle helmets*; <https://unsplash.com/s/photos/motorcycle-helmet> (22.10.2021.)
- [9] *Ebay*; <https://www.ebay.co.uk/itm/254218239828> (22.10.2021.)
- [10] *Harley-Davidson Webshop*; <https://www.harley-davidson.com/us/en/shop/Myer-J08-Modular-Helmet/p/98373-19VX> (22.10.2021.)
- [11] *MotardInn*; <https://www.motardinn.com/motorcycle-equipment/thor-sector-split-mips-motocross-helmet/137278172/p> (22.10.2021.)
- [12] *What Material Choices Are There in Motorcycle Helmet Construction?*; <https://www.motorcycleid.com/articles/what-material-choices-are-there-in-motorcycle-helmet-construction.html> (22.10.2021.)

- [13] Richter, M., Otte, D., Lehmann, U., Chinn, B., Schuller, E., Doyle, D., Sturrock, K., Krettek, *Head Injury Mechanisms in Helmet-Protected Motorcyclists: Prospective Multicenter Study*, The Journal of TRAUMA, 2001.
- [14] *Acrylonitrile butadiene styrene*;  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Acrylonitrile\\_butadiene\\_styrene#Properties](https://en.wikipedia.org/wiki/Acrylonitrile_butadiene_styrene#Properties) (26.10.2021.)
- [15] *What materials are Motorcycle Helmets Made of?*;  
<https://xtremehelmets.com/blog/what-materials-are-motorcycle-helmets-made-of-your-definitive-guide/> (26.10.2021.)
- [16] T. Filetin, F. Kovačićek, J. Indof, *Svojstva i primjena materijala*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Naklada 500 (peto izdanje), Zagreb 2009
- [17] S. Farajzadeh Khosroshahi, U. Galvanetto, M. Ghajari, *Optimization of the Chin Bar of a Composite-Shell Helmet to Mitigate the Upper Neck Force*, Applied Composite Materials, 2017., str. 931.-944.
- [18] *Textile Chopped Strands, Vetrotex*; <https://www.vetrotextextiles.com/products/textile-chopped-strands> (26.10.2021.)
- [19] *The basics of carbon fiber — Watch industry*; <https://rzwatches.com/the-basics-of-carbon-fiber-watch-industry> (26.10.2021.)
- [20] *Fibreglast*; <https://www.fibreglast.com/product/kevlar-carbon-hybrid-yellow-1065/Kevlar> (26.10.2021.)
- [21] *How Bicycle Helmets are Made*; <https://helmets.org/howmade.htm> (26.10.2021.)
- [22] *EXPANDED POLYSTYRENE (EPS)*; <https://www.helmetfacts.com/materials/expanded-polystyrene-eps/> (28.10.2021.)
- [23] *Bicycle Helmet Liners: Foam and Other Materials*; <https://helmets.org/liners.htm> (28.10.2021.)
- [24] *Made-in-China*; <https://dgpmpf.en.made-in-china.com/product/FNTQawKdErhA/China-Quality-EPS-Helmet-Liner-for-Bike-Helmet.html> (28.10.2021.)
- [25] *Alibaba.com*; [https://www.alibaba.com/product-detail/EPP-foam-impact-resistance-motorcycle-helmet\\_60766101952.html](https://www.alibaba.com/product-detail/EPP-foam-impact-resistance-motorcycle-helmet_60766101952.html) (28.10.2021.)
- [26] F.A.O. Fernandes, R.T. Jardim, A.B. Pereira, R.J. Alves de Sousa, *Comparing the mechanical performance of synthetic and natural cellular materials*, Materials & Design, 2017., br. 82, str. 335.-341.

- [27] Ali Marwa A., A. Amr , A. Abou-Okeil , Nermin M. Aly, *Comfort properties of the inner padding layer for motorcycle helmet*, Life Science Journal, 2013., br. 10(4), str. 1386.-1399.
- [28] Amazon.ae; <https://www.amazon.ae/Tactical-Airsoft-Paintball-Protective-Motorcycle/dp/B081LKMVR3> (28.10.2021.)
- [29] *How to select the right visor for your motorcycle helmet?*; <https://redhillmotorcyclewerx.com/how-to-select-right-visor-for-motorcycle-helmet/> (1.11.2021.)
- [30] *What are motorcycle helmets made of?*; <https://www.overdrive.in/news-cars-auto/features/what-are-motorcycle-helmets-made-of/> (1.11.2021.)
- [31] ECE Regulation 22.05, 2002. Uniform provision concerning the approval of protective helmets and their visors for driver and passengers of motor cycles and mopeds. United Nations
- [32] *Skull*; <https://en.wikipedia.org/wiki/Skull> (4.11.2021.)
- [33] J. Fanghanel, F. Pera, F. Anderhuber, R. Nitsch, Waldeyerova anatomija čovjeka, 17. njemačko izdanje prerađeno u cijelosti, 1. hrvatsko izdanje, Zagreb, Golden Marketing-Tehnička knjiga, 2009.
- [34] Human brain: Facts, functions & anatomy; <https://www.livescience.com/29365-human-brain.html> (4.11.2021.)
- [35] Mozak; <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=42173> (4.11.2021.)
- [36] Medicinski priručnik za pacijente: Mozak; <http://www.msd-prirucnici.placebo.hr/msd-za-pacijente/bolesti-mozga-i-zivcanog-sustava/biologija-zivcanog-sustava/mozak> (4.11.2021.)
- [37] Concussion; <https://medlineplus.gov/ency/article/000799.htm> (4.11.2021.)
- [38] Širanović Roman, Analiza naprežanja motociklističke kacige pri udarnom opterećenju, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2017.
- [39] M. Kathiresan, K. Manisekarb, V. Manikandan, *Performance analysis of fibre metal laminated thin conical frustum under axial compression*, Composite Structures, 2012., br. 92, str. 3510. - 3519.
- [40] Jared W. Nelson, Trey W. Riddle, Douglas S. Cairns, *Effects of defects in composite wind turbine blades –Part 2: Progressive damage modeling offiberglass-reinforced epoxy*

- composites with manufacturing-induced waves*, Wind Energy Science, 2017., br. 2, str. 653. - 669.
- [41] *Abaqus 2016 Documentation*; <http://abaqus.software.polimi.it/v2016/index.html> (4.11.2021.)
- [42] S.R. Finn, G.S. Springer, „*Composite Plates Impact Damage*”, *An Atlas*, Lancaster, Pennsylvania 17604 U.S.A.: Technomic Publishing Company, Inc., 1991.
- [43] Fábio A.O. Fernandes, Ricardo J. Alves de Sousa, Rémy Willinger, Caroline Deck, *Finite Element Analysis of Helmeted Impacts and Head Injury Evaluation with a Commercial Road Helmet*, Structural Engineering & Mechanics, 2013., br. 48(5), str. 661. – 679.
- [44] P. Rumianek, T. Dobosz, R. Nowak, P. Dziewit, A. Arominski, *Static Mechanical Properties of Expanded Polypropylene Crushable Foam*; <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7825443/> (4.11.2021.)
- [45] L. Andena, F. Caimmi, L. Leonardi, *Towards Safer Helmets: Characterisation, Modelling and Monitoring*, [https://www.researchgate.net/publication/305080834\\_Towards\\_Safer\\_Helmets\\_Characterisation\\_Modelling\\_and\\_Monitoring](https://www.researchgate.net/publication/305080834_Towards_Safer_Helmets_Characterisation_Modelling_and_Monitoring) (4.11.2021.)
- [46] „*Delamination*”; <https://en.wikipedia.org/wiki/Delamination>, (14.11.2021.)
- [47] Wei Ding „*Delamination Analysis of Composite Laminates*”, Graduate Department of Chemical Engineering and Applied Chemistry, University of Toronto