Numerički proračun kompozitne sportske zaštitne opreme

Čeredar, Marko

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:501790

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-17**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Marko Čeredar

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor: Student:

Izv. prof. dr. sc. Darko Ivančević, mag. ing. Marko Čeredar

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem se svim profesorima i asistentima na stečenom znanju tijekom studiranja, a posebno svom mentoru, izv. prof. dr. sc. Darku Ivančević-u na kvalitetnim savjetima i sugestijama te brzoj i voljnoj pomoći tijekom cijele izrade rada.

Veliko hvala mojoj obitelji koja mi je bila podrška tijekom cijelog studija te hvala prijateljima i kolegama uz koje sam proveo lijepo vrijeme i uživao tijekom studija.

Marko Čeredar

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
Procesno-energetski, konstrukcijski, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodostrojarski

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

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Marko Čeredar** JMBAG: 0035217709

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Numerički proračun kompozitne sportske zaštitne opreme**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Numerical analysis of composite sports protective equipment**

Opis zadatka:

Kompozitni materijali se koriste za izradu raznih oblika sportske zaštitne opreme koja je namijenjena apsorpciji energije prilikom udarnog opterećenja. Mehanička svojstva, pa tako i mogućnost apsorpcije energije udara, ovise o vrsti korištenih materijala i rasporedu slojeva vanjske ljuske, te o vrsti materijala i izvedbi unutarnjeg sloja. Zadatak diplomskog rada je provesti numerički proračun udarno opterećene zaštitne opreme uzimajući u obzir sve relevantne načine popuštanja takve konstrukcije.

U diplomskom radu je potrebno:

- provesti pregled literature o izvedbama i korištenim materijalima u kompozitnoj zaštitnoj opremi
- odabrati vrstu zaštitne opreme koja će se analizirati u radu te izraditi CAD i numerički model
- numeričke simulacije provesti u programu *Abaqus*®
- za modeliranje oštećivanja pri udaru koristiti dostupne konstitutivne modele kompozitnih materijala
- provesti validaciju numeričkog modela oštećivanja usporedbom s dostupnim rezultatima ispitivanja udara u pojednostavljenu višeslojnu kompozitnu konstrukciju
- detaljno opisati odabrane rubne uvjete i opterećenje na osnovu kojih će se provesti proračun
- varirati materijale i raspored slojeva s ciljem određivanja utjecaja na apsorpciju energije prilikom udara
- međusobno usporediti različite razmatrane izvedbe zaštitne opreme te dati kritički osvrt na dobivene rezultate.

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

Zadatak zadan:	Datum predaje rada:	Predvideni datumi obrane:
4. svibnja 2023.	6. srpnja 2023.	17. – 21. srpnja 2023.

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

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

SADRŽAJ

SADRŽAJ I
POPIS SLIKA III
POPIS TABLICA V
POPIS OZNAKA VI
SAŽETAK VIII
SUMMARY IX
1. UVOD 1
2. ZAŠTITNA OPREMA 2
2.1. Povijesni razvoj 2
2.2. Podjela zaštitne opreme 3
2.3. Standardi 7
2.4. POSTUPAK IZRADE ŠTITNIKA POTKOLJENICE 8
2.5. Patenti 10
2.5.1. KR200427143Y1 – štitnik noge 10
2.5.2. US3735419A – štitnik potkoljenice 11
3. KOMPOZITI 12
3.1. Vlakna 12
3.1.1. Staklena vlakna 13
3.1.2. Aramidna vlakna 14
3.1.3. Ugljična vlakna 15
3.2. Matrice 16
3.2.1. Plastomeri 17
3.2.2. Duromeri 17
3.2.3. Metalne matrice 18
3.2.4. Ostale matrice 18
4. ANATOMIJA 19
5. OZLJEDE 22
5.1. Ozljede prilikom motociklizma 22
5.2. Ozljede prilikom sporta 23
6. NUMERIČKI MODEL 24
6.1. Hashin-ov kriterij popuštanja 24
6.2. Crushable foam 28
6.3. Konačni elementi 30
6.3.1. Heksaedarski kontinuirani ljuskasti elementi 30
6.3.2. Linearni heksaedarski konačni elementi 31
6.4. Numerički model kompozitne ploče 32
6.5. Numerički model vanjske ljuske štitnika 35
6.6. Numerički model apsorpcijskog sloja štitnika 38
6.7. Početni i rubni uvjeti 40

7. REZULTATI 42
7.1. Validacija modela oštećenja 42
7.2. Analiza štitnika 43
7.3. Analiza kontaktne sile i energija tijekom udara 57
8. ZAKLJUČAK 64
LITERATURA 66

POPIS SLIKA

Slika 1. Razvitak zaštitne opreme kroz povijest [1] ... 2
Slika 2. Primjer prvih štitnika za kriket [3,4] ... 3
Slika 3. Primjer osnovne zaštitne opreme [6] ... 4
Slika 4. Primjer štitnika za potkoljenicu i štitnika za potkoljenicu sa zaštitom koljena [8,9] ... 4
Slika 5. Primjer fiksnog štitnika za koljeno i potkoljenicu [10] ... 5
Slika 6. Primjer vanjskih ljusaka od kompozita ojačanih ugljičnim i staklenim vlaknima [11] ... 5
Slika 7. Funkcionalni dijelovi štitnika za hokej [14] ... 6
Slika 8. Eksperiment udarnih opterećenja [15] ... 7
Slika 9. Eksperiment prodora tijekom udara s kopačkom [12] ... 8
Slika 10. Kalupljenje vlakana smolom [16] ... 9
Slika 11. a) Model koljena generiran 3D skeniranjem; b) konstruirani 3D model štitnika [17] ... 9
Slika 12. Patent zaštite potkoljenice i koljena KR200427143Y1 [18] ... 10
Slika 13. Patent štitnika potkoljenice US3735419A [19] ... 11
Slika 14. Usmjerenost vlakna: a) kontinuirana; b) slučajno usmjerena diskontinuirana; c) 12
Slika 15. Omjer promjera vlakna i vlačne čvrstoće [22] ... 13
Slika 16. Primjer staklenih vlakna [23] ... 14
Slika 17. Primjer aramidnih vlakna [24] ... 15
Slika 18. Primjer kompozitnog štitnika ojačanog vlaknima i kompozitne ljuske ojačane ugljičnim vlaknima [25,26] ... 16
Slika 19. Koljeni zglob [31] ... 19
Slika 20. Presjek bedrene kosti [33] ... 20
Slika 21. Raspodjela sila na bedrenoj kosti [32] ... 20
Slika 22. Građa bedrene kosti [34] ... 21
Slika 23. Načini pada s motocikla [35] ... 22
Slika 24. Ruptura meniskusa [36] ... 23
Slika 25. Dijagram ekv. naprezanje – ekv. pomak za kompozite s vlaknima [37] ... 26
Slika 26. Dijagram napezanje – istezanje za pjenaste materijale [38] ... 28
Slika 27. *Crushable foam* model s očvršćenjem [37] ... 29
Slika 28. Prikaz ljuskastih elemenata [37] ... 31
Slika 29. Prikaz *C3D8* elementa [39] ... 32
Slika 30. *Hourglass* efekt [40] ... 32
Slika 31. Model kompozitne ploče za ispitivanje udarnih opterećenja [41] ... 33
Slika 32. Prikaz početnih i rubnih uvjeta simulacije kompozitne ploče ... 34
Slika 33. Prikaz početnih i rubnih uvjeta simulacije i generirane mreže konačnih elemenata ... 34
Slika 34. Raspored slojeva kompozitne ploče za validaciju numeričkog pristupa modeliranju oštećenja ... 34
Slika 35. Model vanjske čvrste ljuske 160x90 mm ... 36
Slika 36. Mreža konačnih elemenata vanjske ljuske ... 36
Slika 37. Raspored slojeva vanjske ljuske ... 38
Slika 38. Model apsorpcijskog sloja 160x90 mm ... 39
Slika 39. Mreža konačnih elemenata apsorpcijskog sloja ... 39
Slika 40. Dijagram naprezanje - deformacija: a) EPP [49] b)PU [50] ... 40
Slika 41. Prikaz simulacije udara cilindrom i sferom [mm] ... 41
Slika 42. Spoj mreža konačnih elemenata za cijeli štitnik ... 41

Slika 43. Kriterij inicijacije vlačnog oštećenja matrice vrijednosti za kompozitnu ploču po slojevima 42
Slika 44. Parametar vlačnog oštećenja matrice za kompozitnu ploču po slojevima 43
Slika 45. Prikaz ekvivalentnih plastičnih deformacija [-] kompozitnog štitnika izrađenog od EPP-a ojačanog staklenim vlaknima prilikom udara cilindrom 44
Slika 46. Prikaz ekvivalentnih plastičnih deformacija [-] kompozitnog štitnika izrađenog od EPP-a ojačanog staklenim vlaknima prilikom udara sferom 44
Slika 47. Vlačno popuštanje matrice prema Hashin-ovom kriteriju po slojevima ugljičnih vlakana za $[0/90/0/90]_s$ kod opterećenja cilindrom 45
Slika 48. Vlačno popuštanje matrice prema Hashin-ovom kriteriju po slojevima staklenih vlakana za $[0/90/0/90]_s$ kod opterećenja cilindrom 46
Slika 49. Vlačno popuštanje matrice prema Hashin-ovom kriteriju po slojevima vlakana za $[0/45/90/-45]_2$ kod opterećenja sferom 46
Slika 50. Kriterij inicijacije vlačnog oštećenja matrice po slojevima ugljičnih vlakana za $[0/30/60/90]_s$ kod opterećenja cilindrom 47
Slika 51. Kriterij inicijacije vlačnog oštećenja matrice po slojevima staklenih vlakana za $[0/30/60/90]_s$ kod opterećenja cilindrom 48
Slika 52. Kriterij inicijacije vlačnog oštećenja matrice po slojevima staklenih vlakana za $[0/30/60/90]_s$ kod opterećenja sferom 49
Slika 53. Kriterij inicijacije vlačnog oštećenja matrice po slojevima ugljičnih vlakana za $[0/30/60/90]_s$ kod opterećenja sferom 49
Slika 54. Tlačnog popuštanje vlakana po Hashin-ovom kriteriju za opterećenje cilindrom i sferom 50
Slika 55. Prikaz ekvivalentnih von Mises naprezanja [MPa] vanjske ljuske kroz vrijeme za staklena vlakna opterećena udarom sferom 51
Slika 56. Prikaz ekvivalentnih von Mises naprezanja [MPa] vanjske ljuske za opterećenje cilindrom i sferom 52
Slika 57. Prikaz ekvivalentnih plastičnih deformacija [-] apsorpcijskog sloja za različite kombinacije materijala kod opterećenja cilindrom 53
Slika 58. Prikaz ekvivalentnih von Mises naprezanja [MPa] za apsorpcijski sloj kroz vremenski period sprijeda i u poprečnom presjeku 54
Slika 59. Prikaz ekvivalentnih von Mises naprezanja [MPa] apsorpcijskog sloja za različite kombinacije materijala kod opterećenja cilindrom 54
Slika 60. Prikaz ekvivalentnih plastičnih deformacija [-] apsorpcijskog sloja za različite kombinacije materijala kod opterećenja sferom 55
Slika 61. Prikaz ekvivalentnih von Mises naprezanja [MPa] apsorpcijskog sloja za različite kombinacije materijala kod opterećenja sferom 56
Slika 62. Kontaktna sila prilikom udara cilindrom 57
Slika 63. Kontaktna sila kod kompozita s ugljičnim vlaknima za različit raspored slojeva 58
Slika 64. Kontaktna sila prilikom udara sferom 58
Slika 65. Kontaktna sila kod debljeg apsorpcijskog sloja 59
Slika 66. Prikaz energija za štitnik s EPP pjenom i staklenim vlaknima 60
Slika 67. Prikaz energija za štitnik s EPP pjenom i ugljičnim vlaknima 61
Slika 68. Usporedba energija za udarno opterećenje cilindrom i sferom za staklena vlakna 62
Slika 69. Usporedba energija za različite debljine vanjske ljuske 63
Slika 70. Kontaktna sila kod podebljane vanjske ljuske 63

POPIS TABLICA

Tablica 1. Mehanička svojstva vlakana izrađenih od E-stakla [22] 13
Tablica 2. Mehanička svojstva kevlar 49 vlakna [22] 14
Tablica 3. Mehanička svojstva različitih ugljičnih vlakana [22] 16
Tablica 4. Mehanička svojstva kompozitne ploče [41] 35
Tablica 5. Svojstva epoksidne smole ojačane ugljičnim i staklenim vlaknima [42,43,44,45] 36
Tablica 6. Svojstva PU i EPP [46,47,48] 39
Tablica 7. Nelinearne vrijednosti očvršćenja EPP i PU pjene [49,50] 40

POPIS OZNAKA

Latinične oznake

Oznaka	Jedinica	Opis
A	-	Vrijednost horizontalne p osi
B	-	Vrijednost vertikale q osi
$\mathbf{C}_d$	MPa	Matrica elastičnosti s integriranim oštećenjima
D	-	Parametar u matrici elastičnosti $\mathbf{C}_d$
d	-	Parametri oštećenja
d_f	-	Parametri oštećenja vlakna
d_f^c	-	Parametar tlačnog oštećenja vlakna
d_f^t	-	Parametar vlačnog oštećenja vlakna
d_m	-	Parametri oštećenja matrice
d_m^c	-	Parametar tlačnog oštećenja matrice
d_m^t	-	Parametar vlačnog oštećenja matrice
d_s	-	Parametar smičnog oštećenja
F	-	Površina tečenja prilikom volumnog očvršćenja
F_f^c	-	Indeks tlačnog popuštanja vlakna
F_f^t	-	Indeks vlačnog popuštanja vlakna
F_m^c	-	Indeks tlačnog popuštanja matrice
F_m^t	-	Indeks vlačnog popuštanja matrice
G	MPa	Modul smicanja
G_{1c}	J/m^2	Tlačna energija loma u smjeru vlakana
G_{1t}	J/m^2	Vlačna energija loma u smjeru vlakana
G_{2c}	J/m^2	Tlačna energija loma u smjeru matrice
G_{2t}	J/m^2	Vlačna energija loma u smjeru matrice
k	-	Omjer kompresijskih granica tečenja
k_t	-	Omjer hidrostatskih granica tečenja
L^C	m	Karakteristična duljina
$\mathbf{M}$	-	Matrica oštećenja
p	MPa	Hidrostatski tlak
p_0	MPa	Središte površine elipse tečenja
p_c	MPa	Granica tečenja pri hidrostatskoj kompresiji
p_c^0	MPa	Inicijalna granica tečenja hidrostatske kompresije
p_t	MPa	Čvrstoća materijala kod hidrostatskog vlačnog naprezanja
q	MPa	Ekvivalentno naprezanje prema von Misesu
$\mathbf{S}$	MPa	Devijatorsko naprezanje
S	MPa	Smična čvrstoća sloja
X^C	MPa	Tlačna čvrstoća sloja u smjeru vlakana
X^T	MPa	Vlačna čvrstoća sloja u smjeru vlakana

Y^C	MPa	Tlačna čvrstoća sloja u okomita na smjer vlakana
Y^T	MPa	Vlačna čvrstoća sloja u okomita na smjer vlakana

Grčke oznake

Oznaka	**Jedinica**	**Opis**
$\boldsymbol{\alpha}$	-	Oblikovni faktor za određivanje veličine osi
δ_{eq}	m	Ekvivalentni pomak
δ_{eq}^0	m	Ekvivalentni pomak pri kojem nastaju oštećenja
δ_{eq}^f	m	Ekvivalentni pomak popuštanja sloja
δ_{eq}^{fc}	m	Ekvivalentni pomak pri tlačnom opterećenju vlakna
δ_{eq}^{ft}	m	Ekvivalentni pomak pri vlačnom opterećenju vlakna
δ_{eq}^{mc}	m	Ekvivalentni pomak pri tlačnom opterećenju matrice
δ_{eq}^{mt}	m	Ekvivalentni pomak pri vlačnom opterećenju matrice
ε_{ij}	mm/mm	Tenzor deformacija
ε_{axial}^{pl}	mm/mm	Volumna plastična deformacija gnječenja
ε_{vol}^{pl}	mm/mm	Jednoosna plastična deformacija gnječenja
ν_{ij}	-	Poisonovi faktori
ρ	kg/m3	Gustoća
σ_{ij}	MPa	Tenzor normalnog naprezanja
σ_c^0	MPa	Inicijalna granica tečenja jednoosne kompresije
σ_{eq}^{fc}	MPa	Ekvivalentno naprezanje pri tlačnom opterećenju vlakna
σ_{eq}^{ft}	MPa	Ekvivalentno naprezanje pri vlačnom opterećenju vlakna
σ_{eq}^{mc}	MPa	Ekvivalentno naprezanje pri tlačnom opterećenju matrice
σ_{eq}^{mt}	MPa	Ekvivalentno naprezanje pri vlačnom opterećenju matrice
$\hat{\sigma}_{ij}$	MPa	Efektivni tenzor naprezanja nakon pojave oštećenja
τ_{ij}	MPa	Tenzor smičnog naprezanja
$\hat{\tau}_{ij}$	MPa	Tenzor smičnog naprezanja nakon pojave oštećenja

SAŽETAK

Zaštitna oprema važan je dio svake sportske aktivnosti te se koristi u svrhu smanjenja mogućeg nastanka ozlijede na ljudskom organizmu. U ovom diplomskom radu dan je pregled zaštitne opreme, te je odabran štitnik potkoljenice kao vrsta zaštitne opreme na kojoj je provedena numerička analiza udarnog opterećenja u programskom paketu *Abaqus/Explicit*. Štitnik potkoljenice može se podijeliti u dva glavna dijela, vanjska čvrsta ljuska i unutarnji apsorpcijski sloj koji su u svrhu ovog rada bili modelirani u programskom paketu *Solidworks*. Rubni i početni uvjeti opterećenja za analizu definirani su prema podacima iz literaturi. Nadalje, osim odabira zaštitne opreme dan je pregled anatomije i najčešćih ozljeda potkoljenice i zgloba koljena, te je odabran standard koji definira vrstu eksperimenta i očekivane rezultate kako bi štitnik potkoljenice zadovoljio sve uvjete prema kojima je rađena simulacija. Kako je štitnik izrađen od kompozitnih materijala, napravljen je pregled mehaničkih svojstva kompozitnih materijala. Za validaciju numeričkog modela korištena je višeslojna kompozitna ploča modelirana prema literaturi i očekivani rezultati potvrdili su pouzdanost numeričkog modela za udarna oštećenja višeslojne kompozitne ploče. Kako bi se približio način rada programskog paketa *Abaqus,* dan je pregled izraza uz teorijsku pozadinu za kriterij popuštanja i plastične deformacije pjenastih materijala. Na kraju su prikazani rezultati numeričke analize za apsorpcijski sloj i vanjsku ljusku štitnika te su za cjelokupni štitnik prikazani rezultati kontaktne sile između štitnika i noge, a osim kontaktne sile prikazane su i energije koje se razvijaju prilikom pretvorbe kinetičke energije udarača prilikom udara o štitnik.

Ključne riječi: Štitnik potkoljenice, numeričko modeliranje udarnog opterećenja, metoda konačnih elemenata, kriterij popuštanja.

SUMMARY

Protective gear is an important part of every sports activity and it is used for the reduction of the possibility that an injury on the human body can be created. In this Master's thesis, the review of protective gear is given and a shin guard was chosen as the protective gear type on which the impact numerical analysis is conducted with the software *Abaqus/Explicit*. Shin guard can be divided into two major parts, an outer protective shell and an internal absorption layer which were modeled in the software *Solidworks*. Boundary, as well as initial conditions for numerical analysis were modeled according to the information found in literature. Furthermore, alongside choosing the protective gear, a review of the anatomy and the most frequent injury mechanisms for the shin and the knee joint is given, and a standard that defines the experiment type and the expected results for shin guards is selected for modeling the simulation accordingly. As the shin guard is made out of composite materials, the mechanical properties of composite materials is shown. To validate the numerical model, multiply composite plate has been modeled according to the literature and the results confirmed the reliability of the numerical model for impact damage of laminated composite plate. To elaborate the way the software *Abaqus* works, formulae as well as a theoretical basis for failure criterion and plastic deformation of foam materials is given. In the end, the results of the numerical analysis for the absorption layer and the outer shell are shown, as well as, for coomplete shin guard, the contact force between the shin guard and the leg, as well as energies which are developed during the conveyance of kinetic energy from the impactor to the guard.

Key words: Shin guard, numerical modeling of impact damage, finite element method, failure criterion.

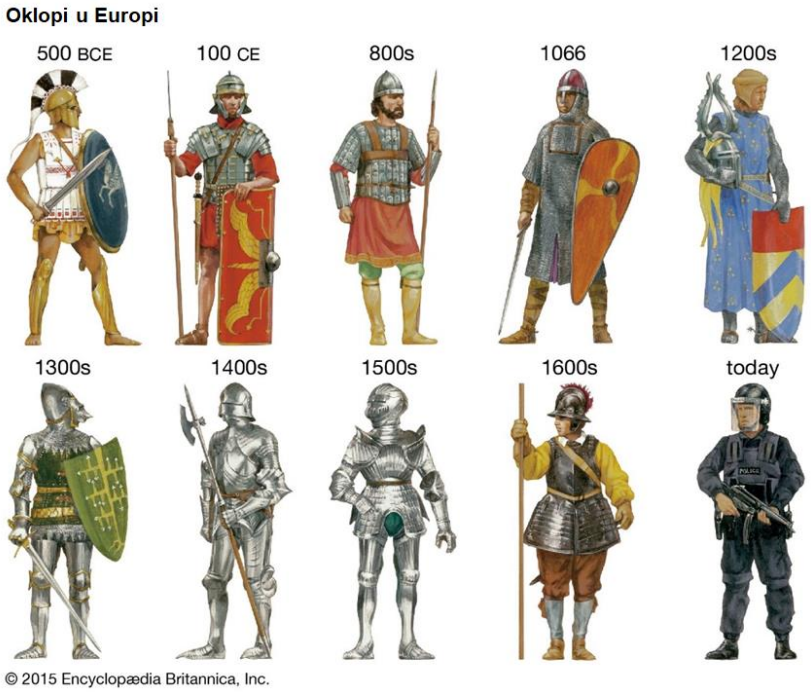
1. UVOD

Aktivan život važan je za zdravlje čovjeka i pomaže organizmu u mnogim aspektima poput održavanja zdravlja i bioritma. Takav život podrazumijeva bilo kakve aktivnosti kojima je čovjek izložen nekom opterećenju, što može obuhvaćati: sport, rekreativne zimske aktivnosti poput skijanja i aktivnosti u kojima se vlastitom energijom čovjek prenese s jednog položaja na drugi, primjerice, vožnja biciklom. Svaka aktivnost može za posljedicu imati štetne utjecaje na organizam ukoliko se pravilno ne primjenjuje, npr. padom prilikom skijanja može doći do prijeloma kostiju ruke ili noge. Nadalje, prilikom kompetitivnih sportova (npr. boks) može doći do ciljanog ili nenamjernog fizičkog kontakta između ljudi, a prilikom transporta putem bicikla ili motora pri većim brzinama uz prijelome također može doći i do oštećenja tkiva u doticaju s abrazivnim asfaltom. Iz tog razloga razvila se brojna zaštitna oprema kako bi se što više ublažile ozljede organizma prilikom takvih aktivnosti. U nastavku ovog diplomskog rada dan je pregled zaštitne opreme te je nakon odabira jedne vrste opreme provedena je numerička analiza u programskom paketu *Abaqus/Explicit*.

2. ZAŠTITNA OPREMA

2.1. Povijesni razvoj

Kroz povijest, zaštitna oprema očituje se u borbenim oklopima čije je korištenje znatno utjecalo na ishod povijenih bitaka, smanjujući količinu i stupanj ozljeda koje mogu znatno smanjiti pokretljivost ljudskog tijela. S druge strane, određeni tipovi ozljeda, poput ubodnih rana, radi nerazvijenosti medicine dovodile su do iskrvarenja. Oklop se definira kao zaštitna odjeća sa sposobnošću odbijanja ili apsorpcije udarnih opterećenja induciranih projektilima ili oružjem [1]. U početku su oklopi bili rađeni od raznih tkanina ili koža s ojačanjima izrađenim od čelika, drva ili kostiju te su štitili samo vitalne dijelove tijela. Njihovim razvitkom kroz stoljeća, lagani kožnati oklopi zamjenjuju se oklopima napravljenih od čelika kako bi se postigla najveća sigurnost, no ljudska pokretljivost u takvom oklopu bila je znatno smanjena. Danas s razvitkom kompozitnih materijala, moguće je postići vrlo visok faktor zaštite, odnosno zaštitnu opremu s vrlo visokom otpornošću na udarna opterećenja uz znatno niže težine u usporedbi s čeličnim oklopima. Slika 1. prikazuje razvoj oklopa nošenih u Europi od 500 god. prije Krista do danas [1].



Slika 1. Razvitak zaštitne opreme kroz povijest [1]

U sferi sporta prva zaštitna oprema pojavila se u 19. stoljeću kada je *rugby* igrač Mark Mullaney radi ozljede na oku koristio zaštitni vizir [2]. Nadalje, u kriketu početkom 19-og stoljeća počeli su se prvi puta koristiti štitnici za potkoljenice kako bi braniči mogli obraniti cijelim tijelom

bez straha od ozlijede što je davalo veliku prednost. U današnje vrijeme takvi štitnici se najviše koriste u nogometu kod kojeg dolazi do naviše ozljeda donjih ekstremiteta, bilo radi pretjeranog izlaganja opterećenju prilikom udara, ili prilikom fizičkog kontakta dvaju igrača. Na Slici 2. vidljiv je prvi štitnik koji je bio izrađen od drveta i kožnih remena s kopčom [2].

Slika 2. Primjer prvih štitnika za kriket [3,4]

2.2. Podjela zaštitne opreme

Većina sportova ima svoju propisanu zaštitnu opremu koja je prilagođena toj vrsti sporta za smanjenje ozljeda. Uglavnom u to spadaju: zaštitna kaciga, štitnici za koljena i potkoljenicu, štitnici za laktove i podlakticu, rukavice i zaštitni viziri za oči. Kod fizički zahtjevnijih sportova poput *rugby*-a ili borilačkih sportova, te sportova gdje se prati brzina, uz prethodno navedenu zaštitnu opremu ubraja se i štitnik za prsni koš, rebra i leđa. S druge strane, sportovi koji zahtijevaju brzinu i profinjenost poput mačevanja ili streličarstva sadrže posebnu zaštitnu opremu koja se ne može pronaći niti u jednom drugom sportu poput kacige s mrežastom zaštitom za lice ili rukavica za zaštitu prstiju prilikom otpuštanja strijele. Štitnici potkoljenice su odabrana zaštitna odjeća na kojoj će biti provedena numerička analiza. Primjer općenite zaštitne odjeće koja se može naći u većini sportova vidljiv je na Slici 3. prema [5].

Slika 3. Primjer osnovne zaštitne opreme [6]

Ako se sagledaju današnji štitnici, po građi se mogu raspoznati dvije glavne komponente: vanjske čvrste ljuske i unutarnji mekani sloj koji prianja uz kožu. Vanjska ljuska ima svrhu širenja udarnog opterećenja na veću površinu, dok unutarnji sloj apsorbira energiju udara bi se spriječio njen kontakt s ljudskim tijelom. Štitnici su uglavnom tkaneni, cilindričnog oblika sa zaštitnim dijelom sprijeda i samo se navuku na nogu, no to može varirati. Ovisno o sportu i aktivnosti za koju se štitnici konstruiraju, na štitnike se nadodaju jastučići za dodatno prigušenje udarnih opterećenja ili se dodaju pločice kao dodatna zaštita [7]. Za ekstremnije sportove koriste se štitnici potkoljenice u kombinaciji sa štitnicima koljena i kod takvih vrsta štitnika prianjanje uz tijelo postignuto je kopčama i remenima. Gibanje koljena sa štitnikom omogućeno je na dva načina: segmentacijom štitnika na dva manja koja su povezana tkaninom, ili fiksnom vezom gdje štitnik pokriva samo donji dio koljena. Slika 4. lijevo prikazuje segmentirani štitnik, dok je na Slici 4. desno vidljiv fiksni štitnik.

Slika 4. Primjer štitnika za potkoljenicu i štitnika za potkoljenicu sa zaštitom koljena [8,9]

Vanjska čvrsta ljuska može biti izrađena od polimera poput polipropilena ili polietilena, zatim od kompozitnih materijala ojačanih staklenim, ugljičnim ili kevlar vlaknima, te postoje neke izvedbe s metalima i metalnim ojačanjima. Polietilen i polipropilen su najrasprostranjeniji zbog jednostavnosti serijske izrade, no po svojstvima zaostaju za kompozitima ojačanim vlaknima. S druge strane, metalne ljuske pružaju iznimno veliku stopu zaštite, ali masa štitnika znatno je veća u usporedbi s ostalim izvedbama. Iz tog razloga se štitnici s metalnim ljuskama prikazani na Slici 5. koriste u svrhu zaštite prilikom vožnje motociklom.

Slika 5. Primjer fiksnog štitnika za koljeno i potkoljenicu [10]

Jedan od primjera primjene ljuske ojačane ugljičnim vlaknima koristi se u svrhu zaštite prilikom primjerice bicikliranja kako bi se smanjila masa i olakšalo bicikliranje, što u sferi profesionalnog kompetitivnog bicikliranja može utjecati na rezultate. Osim u sferi bicikliranja, takvi se štitnici koriste i u nogometu. Slika 6. prikazuje vanjske ljuske štitnika za nogomet.

Slika 6. Primjer vanjskih ljusaka od kompozita ojačanih ugljičnim i staklenim vlaknima [11]

Za unutarnji mekani sloj koriste se polimerni materijali niske gustoće, visoke apsorpcije udara koji uz to pokazuju biokompatibilna svojstva [12]. Pojam biokompatibilna svojstva predstavlja kompatibilnost materijala s ljudskim tkivom te su nužna kako ne bi došlo do ozlijede kože i

potkožnog tkiva uslijed kontakta sa štitnikom. Jedan takav materijal je etil-vinil acetat (EVA), kopolimer koji se smatra „pjenastom gumom“ radi svojih svojstva i ima široku primjenu u prigušenju udarnih opterećenja [13]. Drugi materijal koji je našao svoju uporabu u izradi štitnika je poliuretanska pjena. Ona posjeduje izrazito duktilna svojstva i prilikom udara dolazi do visokog trošenja energije razvijene prilikom udara na plastičnu deformaciju. Na taj način osigurava se minimalno dopiranje udarnog opterećenja do potkoljenice i do nastanka oštećenja [7,13]. Osim izvedbe s ljuskama koriste se i razni tekstilni materijali i gelovi. Tekstilni materijali svojom debljinom, a gelovi svojom viskoznošću ublažuju i prigušuju udarna opterećenja.

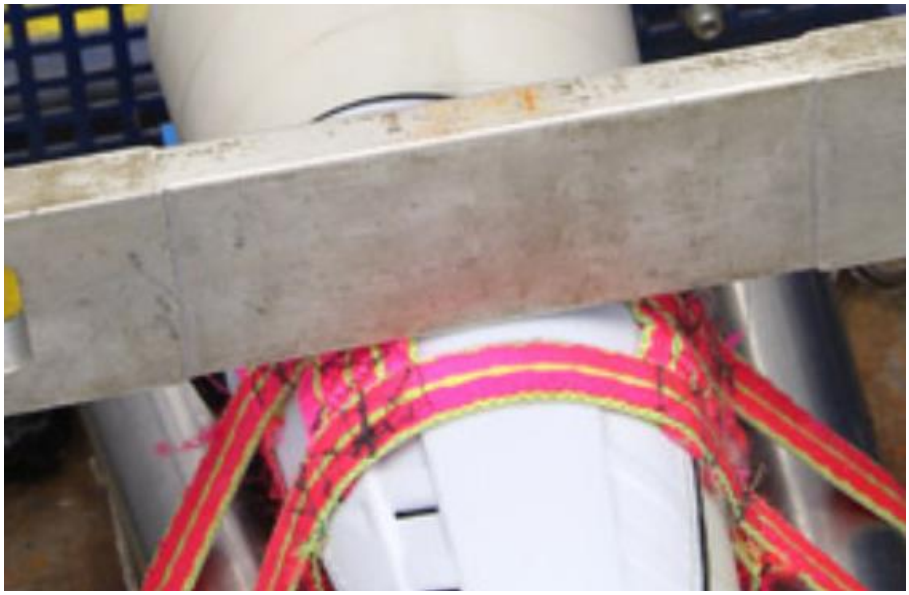
Što se tiče prianjanja uz tijelo, osim izravnog kontakta s apsorpcijskim slojem postoje tekstilni materijali koji se navuku preko noge, nakon čega se njihovo osiguranje od pomicanja postiže povezivanjem kopčama ili remenom. Tekstil koji se najčešće koristi je napravljen od neoprena, mekanog i udobnog materijala koji pruža zaštitu od vibracija i trenja, a ujedno je i dovoljno rastezljiv da se može dobro prilagoditi samoj potkoljenici. Na Slici 7. prikazani su funkcionalni dijelovi štitnika za hokej.

1. Gornji pokrov koljena
2. Štitnik koljena
3. Unutarnja podstava
4. Bočni pokrov koljena
5. Štitnik potkoljenice
6. Zaštita lista

Slika 7. Funkcionalni dijelovi štitnika za hokej [14]

2.3. Standardi

Prema standardu EN 13061:2009 (štitnici potkoljenice za nogomet) definiraju se svojstva poput otpornosti na udarna opterećenja, ali uzimaju se u obzir i udobnost i prianjanje. Provode se udarna ispitivanja u svrhu evaluacije svojstva apsorpcije udarnog opterećenja i svojstva otpora probijanja kroz štitnik. Evaluacija apsorpcije energije udara provodi se na način da se štitnik učvrsti stegom za cijev koja predstavlja nogu. Vertikalno iznad štitnika se pozicionira teret mase 1 kg i nakon što se teret otpusti mjeri se količina sile prenošene kroz štitnik sve do cijevi. Važno je za napomenuti da unutar standarda nije definirana visina s koje je teret otpušten, a skladno tome, nije poznata ni potencijalna energija. Ukoliko je izmjerena sila veća od 2 kN, štitnik ne zadovoljava standard [15]. Primjer ispitivanja prikazan je na Slici 8.



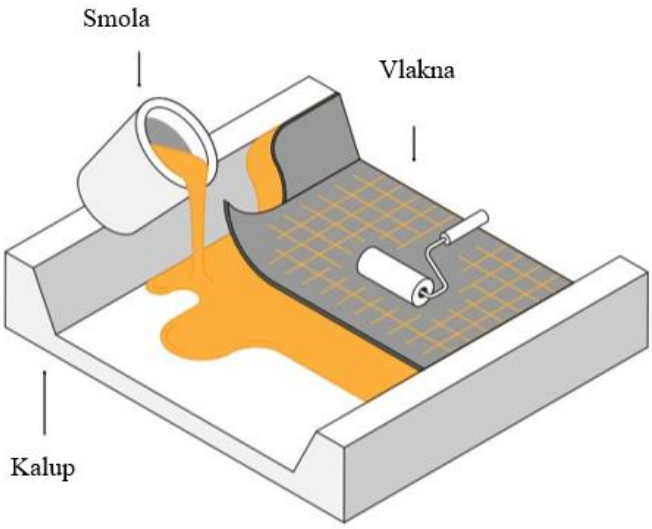
Slika 8. Eksperiment udarnih opterećenja [15]

Za evaluaciju probojnih svojstva štitnik se montira na koničnu spravu i provjerava se prodor čepova na kopačkama prilikom udara. Ukoliko ne dođe do penetracije štitnika prilikom udara, a pritom da je proklizavanje udarača minimalno, štitnik zadovoljava standard. Također, standard još zahtijeva da štitnici odgovaraju na točnu veličinu za koju se konstruiraju i da zadovoljavaju ergonomske kriterije kako ne bi došlo do sprječavanja ili ograničenja gibanja prilikom nošenja. Ne smije doći do relativnog gibanja štitnika u odnosu na čovjeka (proklizavanja) i sam štitnik ne smije imati oštre rubove koji bi pružali nelagodu ili omogućili ozljedu prilikom nošenja. Slika 9. prikazuje eksperiment prodora [15].

Slika 9. Eksperiment prodora tijekom udara s kopačkom [12]

2.4. POSTUPAK IZRADE ŠTITNIKA POTKOLJENICE

Oblikovanje i izrada štitnika može se postići na više načina. Kako su polietilenski štitnici najrasprostranjeniji, konvencionalno najrašireniji postupak izrade je izrada lijevanjem. Kalup se izrađuje od gipsa i prilagođava se obliku potkoljenice na način da se na potkoljenicu nanese gaza u svrhu zaštite, te se na gazu nanose slojevi gipsa. Nakon sušenja, kalup se otvara i uklanja se s potkoljenice te se u njega stavlja odabrani materijal u obliku štitnika. Nadalje, postupkom toplinske obrade dolazi do širenja materijala prema kalupu te on poprima oblik kalupa. Daljnjim hlađenjem će takav materijal očuvati takav oblik, te se na njega dodaju materijali unutarnje i vanjske ljuske. Osim lijevanja još se koristi postupak ručne izrade gdje se materijal ručno veže i šiva kako bi se dobio visoko kvalitetan dugotrajan štitnik za primjerice borilačke sportove te postupak lijepljenja gdje se spajaju materijali adhezijom kako bi se postigao oblik štitnika. Ljuske ojačane vlaknima poprimaju svoj oblik kalupljenjem na sličan način kao i polietilenske, samo što se umjesto polimera, stavljaju vezane tkanine vlakna u smolu i premazuju se njome. Taj se postupak ponavlja sve dok se ne postigne dovoljan broj slojeva. Takav postupak kalupljenja prikazan je na Slici 10.



Slika 10. Kalupljenje vlakana smolom [16]

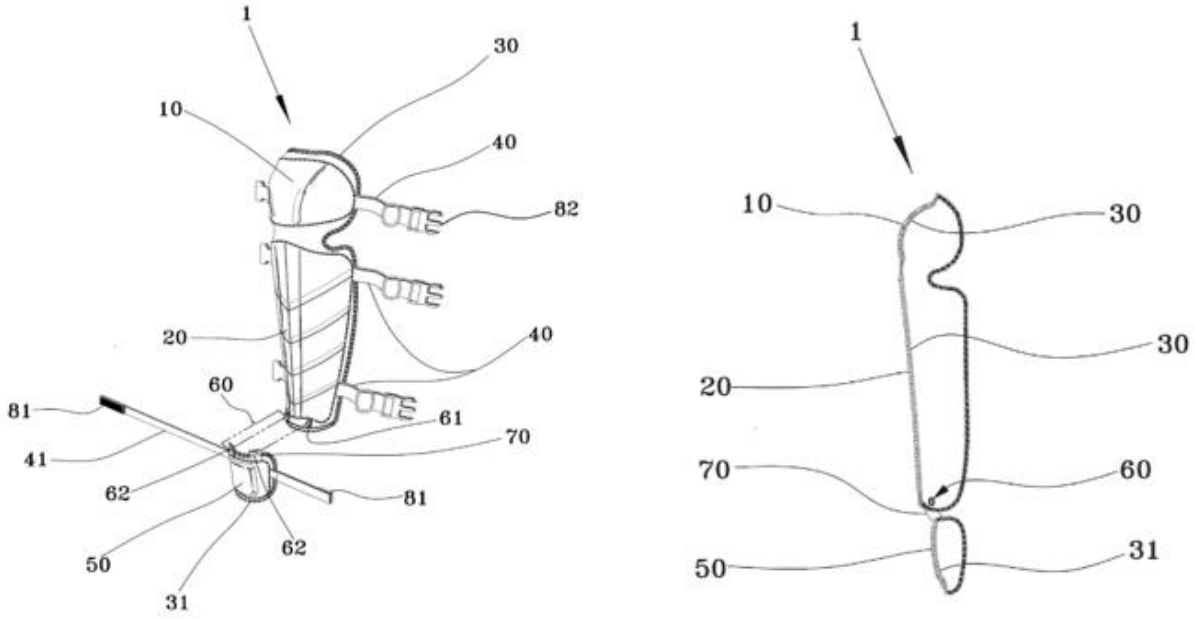
Moderniji način izrade štitnika podrazumijeva aditivnu proizvodnju 3D printanjem. Prednost te tehnologije izrade je u tome da se može izraditi štitnik kompleksne geometrije primjerice profilirane kontaktne površine u svrhu postizanja ventilacije što nije moguće postići konvencionalnim tehnologijama izrade. Cijeli postupak izrade započinje 3D skeniranjem potkoljenice kako bi se dobio okvirni model potkoljenice (Slika 11. lijevo). Na temelju tog modela izrađuje se CAD model štitnika vidljiv na Slici 11. desno i definiraju se značajke poput prianjanja, debljine i geometrije samog štitnika. Nakon modeliranja štitnika potrebno je pripremiti 3D pisač za tiskanje koji uglavnom koristi termoplastični elastomer kao radni materijal. Slojevitim dodavanjem materijala štitnik poprima svoj oblik te je nakon završetka printa potrebno obraditi vanjsku površinu štitnika kako bi se uklonio višak materijala. Na takav gotovi štitnik potrebno je samo nadodati kopče i remenje i spreman je za uporabu.

Slika 11. a) Model koljena generiran 3D skeniranjem; b) konstruirani 3D model štitnika [17]

2.5. Patenti

2.5.1. KR200427143Y1 – štitnik noge

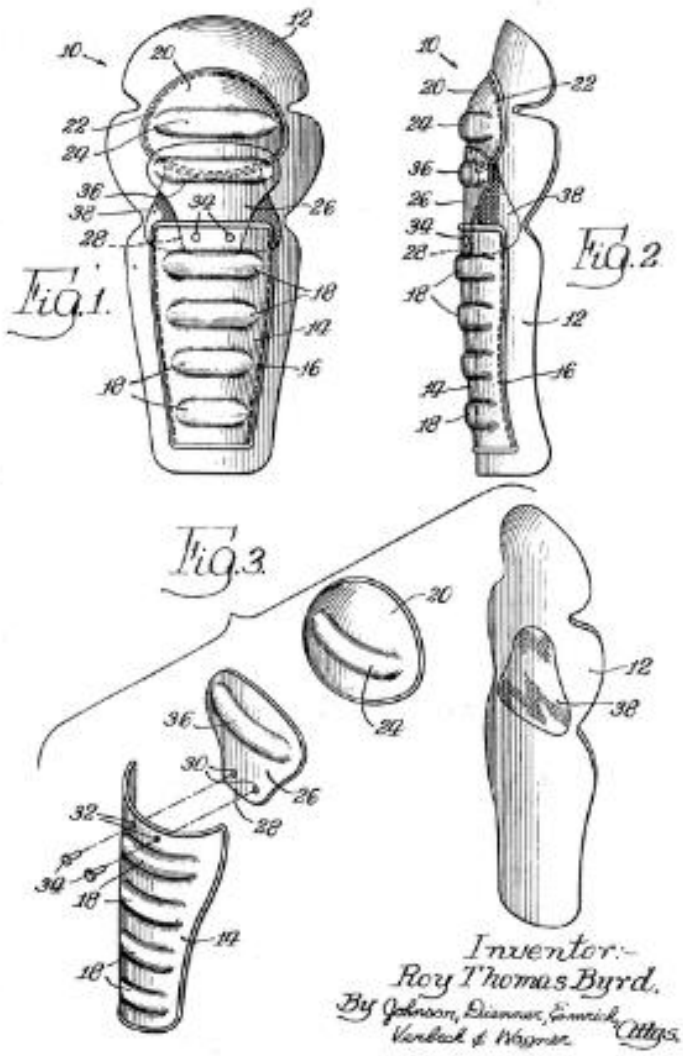
Prikazani patent na Slici 12. koristi se kao štitnik kojem je primarna funkcija zaštita tijekom motocikliranja, ali sporedno se koristi kao zaštita prilikom košnje trave pošto se uvidio problem odvajanja oštrica kosilice prilikom rada što može dovesti do povrede nogu. Zaštitne komponente vidljive na Slici 12. su zaštita potkoljenice (20), koljena (10) i gornjeg tijela stopala (62). Sami štitnik sastoji se od apsorbirajuće tkanine (31) na koju se postavi štitni dio izrađen od sintetičke smole. Tkanina ublažava udarna opterećenja koja bi se prenijela na koljeno ukoliko bi koljeno bilo u neposrednom kontaktu sa zaštitnim dijelom. Prihvat za nogu riješen je putem podesivih remena (40) s plastičnim plastičnim kopčama (82) kako bi se omogućilo brzo stavljanje štitnika. Štitnik stopala (50) odvojiv je putem dugmadi (60) u slučaju da nema potrebe za njim te se može jednostavno montirati [18].



Slika 12. Patent zaštite potkoljenice i koljena KR200427143Y1 [18]

2.5.2. US3735419A – štitnik potkoljenice

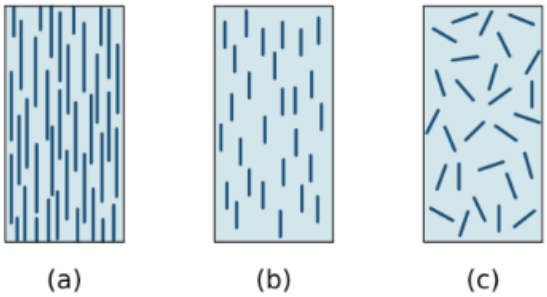
Dani patent (Slika 13.) proširuje štitnik potkoljenice i preklapa ga sa štitnikom koljena te na taj način maksimizira površinu na koju se raspoređuje udarno opterećenje. Cijeli štitnik je na Slici 13. označen s (10) i zaobljenog je oblika kako bi bolje prianjao uz nogu. Unutrašnjost mu je izrađena od laganog elastomera (12) visoke gustoće vidljivog na Slici 13., dok je vanjska ljuska (14) napravljena od čvrstog polimernog materijala ili kompozita ojačanog vlaknima. Kako je njegova primarna funkcija zaštita prilikom hokeja, nadodana su dodatna horizontalna ojačanja (18) izrađena od bambusa ili tvrde plastike kako bi se dobilo na segmentacijskoj debljini bez pretjeranog povećanja mase u svrhu boljeg otpora prodiranju hokejaške loptice. Sami štitnik nasjeda na prigušnu tkaninu (12) koja je dodatno ojačana tkaninom za teške poslove (38) na mjestu pozicioniranja zaštitnog dijela koljenja (20) [19].



Slika 13. Patent štitnika potkoljenice US3735419A [19]

3. KOMPOZITI

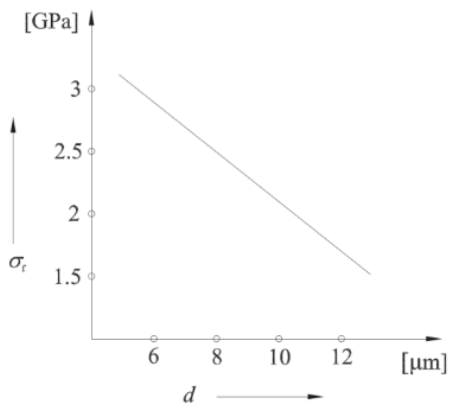
Kompozitni materijali podrazumijevaju spoj dvaju različitih materijala s jasno izraženom granicom između njih [19]. Izrađeni su od matrice i ojačala. Matrica povezuje ojačala te ih štiti od okolnih utjecaja i daje sami oblik kompozitu, dok ojačala poboljšavaju svojstva, daju visoku čvrstoću i modul elastičnosti i druga svojstva potrebna za kompozit. Ojačala su u većini kompozita vlakna, no mogu biti i male čestice. Glavna razlika između čestica i vlakna očituje se u tome da vlakna imaju jednu dimenziju znatno izraženu u usporedni s druge dvije, što rezultira anizotropnim svojstvima. Usmjerenost vlakna ima utjecaj na svojstva te se dijele na slučajno kontinuirana, usmjerena diskontinuirana ili višesmjerno kontinuirana kao što je vidljivo na Slici 14. [20].



Slika 14. Usmjerenost vlakna: a) kontinuirana; b) slučajno usmjerena diskontinuirana; c) višesmjerna [21]

3.1. Vlakna

Za izradu kompozitnih materija s vlaknima, pa tako i štitnika, koriste se tri osnovne skupine vlakna: staklena, aramidna i ugljična. Vlakna imaju iznimno mali volumen zbog malih dviju dimenzija. S tako malim volumenom mala je i vjerojatnost pojave mikropukotina unutar samog vlakna, a sa smanjenom vjerojatnosti za pojavu pukotina, smanjena je i vjerojatnost propagacije pukotine do loma. Iz tog razloga vlačna čvrstoća vlakna iznimno je visoka. Slika 15. prikazuje ovisnost vlačne čvrstoće kompozita o promjeru vlakna [20,22].



Slika 15. Omjer promjera vlakna i vlačne čvrstoće [22]

3.1.1. Staklena vlakna

Staklena vlakna čine 90 % svih proizvedenih kompozita ojačanih vlaknima [22]. Imaju dobra mehanička svojstva te su ekonomski prihvatljiva. Silicijev oksid (SiO_2), glavna sastavnica stakla, lako se tali i miješa s raznim mineralima koji sadrže okside. U pogledu natapanja vlakna materijalom matrice, staklena vlakna stvaraju iznimno dobru vezu. Otporna su na koroziju i koriste se u svrhu toplinske i zvučne izolacije (staklena vuna). Ekonomska prihvatljivost proizlazi iz jeftine izrade i komercijalne uporabe za svakodnevni sport. Zbog vrlo jednostavnog rukovanja moguće je napraviti personalizirani primitivni štitnik kod kuće. Staklena vlakna dijele se u četiri skupine:

A-, C-, E- i S-staklo. A-stakla predstavljaju začetnike staklenih vlakna koja se danas rijetko koriste. C-stakla imaju povišenu otpornost na kiseline i lužine i ne koriste se u sportovima, no mogla bi se koristiti kod osoba koje imaju problema s pretjeranim znojenjem iz razloga što je znoj kiseo po pH vrijednosti. S-stakla karakterizira povećana čvrstoća i modul elastičnosti i koriste se kod konstrukcija kod kojih je potrebna visoka specifična krutost i čvrstoća. E-stakla najrasprostranjenija su i posjeduju otpornost na vlagu i blaže kemikalije, tako da su pogodna za sportove na ledu. U Tablici 1. vidljiva su mehanička svojstva E-staklnenih vlakna [20,22]. Slika 16. prikazuje primjer staklenih vlakna.

Tablica 1. Mehanička svojstva vlakana izrađenih od E-stakla [22]

Promjer - d [μm]	14
Gustoća - ρ [kg/m^3]	2540
Young-ov modul - E [GPa]	72,4
Vlačna čvrstoća - σ_v [GPa]	3,45
Prekidno produljenje – ε [%]	3,2

Slika 16. Primjer staklenih vlakna [23]

3.1.2. Aramidna vlakna

Aramid pruža iznimno visoku žilavost i stupanj anizotropnosti [20]. Poznat je i kao kevlar 49 te se koristi u antibalističke svrhe poput pancirka i zaštitnih kaciga, glavni je materijal za izradu vatrootpornih odijela, a koristi se i za boce pod pritiskom i mnoge druge primjene. Otporan je na abraziju, ali je higroskopan i osjetljiv na UV zračenje (dolazi do pucanja makromolekularnih veza). U sportu se ne koriste često radi svoje higroskopnosti i degradacije prilikom izloženosti UV zrakama, no postoje iznimke poput paintball-a gdje se postižu visoka lokalizirana udarna opterećenja prilikom kolizije loptice sa štitnikom. Njihova svojstva direktno su povezana s njihovom mikrostrukturom. Polimerne molekule stvaraju ravninske površine velike krutosti, a međusobno su povezane slabim vodikovim vezama, zbog čega kevlar vlakna imaju nizak modul smicanja u uzdužnom smjeru, slaba svojstva u poprečnom smjeru i malu uzdužnu tlačnu čvrstoću. S druge strane, postoji i kevlar 29 koji se koristi kao ojačanje radijalnih guma za avione i teretna vozila. Tablica 2. prikazuje mehanička svojstva kevlar 49 vlakna. Na slici 17. prikazana su aramidna vlakna i njihova primjena u zaštitnom prsluku [20,22]

Tablica 2. Mehanička svojstva kevlar 49 vlakna [22]

Promjer - d [μm]	12
Gustoća - ρ [kg/m^3]	1479
Young-ov modul - E [GPa]	131
Vlačna čvrstoća - σ_v [GPa]	3,79
Prekidno produljenje – ε [%]	2,8

Slika 17. Primjer aramidnih vlakna [24]

3.1.3. Ugljična vlakna

Ugljična vlakna su atomi ugljika relativno pravilno složeni u kristalnoj rešetki. Unutar slojeva su atomi ugljika povezani kovalentnim vezama, dok su između slojeva slabe van der Waalsove veze. Imaju visoku krutost te imaju svojstvo zadržavanja vlačne čvrstoće i modula elastičnosti pri povišenim temperaturama. Iznimno su toplinski i električno vodljivi, te se radi svoje električne vodljivosti trebaju držati u posebno ventiliranom prostoru prilikom proizvodnje kako ne bi došlo do udara uslijed statičkog elektriciteta induciranom prašinom. Ugljična vlakna u sportu svoje su mjesto našla u profesionalnom sportu u zamjenu za staklena vlakna te se koriste kao najčvršća oprema za motociklizam. Ugljična vlakna mogu se podijeliti u četiri skupine: ugljična vlakna visoke čvrstoće (HS), ugljična vlakna umjerenog modula elastičnosti (IM), ugljična vlakna visokog modula elastičnosti (HM) i ugljična vlakna vrlo visokog modula elastičnost (UHM). Prva ugljična vlakna bila su od rayon-a, no tim postupkom nije bilo moguće dobiti visoki postotak ugljika unutar vlakna što znači da su i mehanička svojstva lošija. Danas se ugljična vlakna dobivaju procesom karbonizacije poliakrilonitril vlakna (PAN) ili iz raznih smola, tzv. *Pitch* postupak. PAN postupkom moguće je postići do 50 % ugljika unutar vlakna dok se iz smola može dobiti do 80 % ugljika. Samim time vlakna dobivena iz smole imaju veće

module elastičnosti u odnosu na PAN vlakna, no imaju i smanjenu vlačnu i tlačnu čvrstoću. Mehanička svojstva različitih ugljičnih vlakna prikazana su u Tablici 3., dok Slika 18. prikazuje primjer kompozita izrađenih od ugljičnih vlakna ugljičnih vlakna lijevo, a desno je vidljiva kompozitna ljuska od ugljičnih vlakna [20,22].

Tablica 3. Mehanička svojstva različitih ugljičnih vlakana [22]

	PAN - IM	PAN - UHM	Pitch
Promjer - d [μm]	9	10	11
Gustoća - ρ [kg/m^3]	1800	1860	2020
Young-ov modul - E [GPa]	276	517	345
Vlačna čvrstoća - σ_v [GPa]	2,93	1,72	1,72
Prekidno produljenje – ε [%]	1	0,4	0,9

Slika 18. Primjer kompozitnog štitnika ojačanog vlaknima i kompozitne ljuske ojačane ugljičnim vlaknima [25,26]

3.2. Matrice

Postoje četiri glavne funkcije matrice: prenošenje opterećenja na vlakna, definiranje vanjskog oblika kompozita, zaštita vlakana od vanjskih utjecaja i njihovo odvajanje kako bi se spriječilo širenje pukotine unutar kompozita [22]. Matrica određuje uzdužnu tlačnu, poprečnu vlačnu i međuslojnu posmičnu čvrstoću kompozita. Prilikom izlaganja vanjskim utjecajima, degradacija svojstava prvo nastupa na matrici što utječe na svojstva matrice. Jedno od najvažnijih fizikalnih svojstva matrice je temperatura stakališta (engl. *Glass transition temperature*) i ta temperatura promjenjiva je ovisno o udjelu vlage unutar matrice prije skrućivanja. Matrice se mogu

podijeliti u tri osnovne skupine: polimerne(engl. *Polymer matrix composites* - PMC) koje se dijele na plastomerne i duromerne, metalne (engl. *Metal matrix composites* - MMC) i keramičke (engl. *Ceramic matrix composites* - CMC) [20, 22]

3.2.1. Plastomeri

Plastomeri kao materijal matrice slabo upijaju vlagu što je dobro u slučaju kompozitnih konstrukcija te nisu osjetljivi na udarna opterećenja do velike mjere [20]. Kompozitne konstrukcije s plastomernom matricom imaju sposobnost „popravka“ ponovnim zagrijavanjem te se mogu zavarivati ili nakon životnog vijeka reciklirati, no za proces polimerizacije potrebne su iznimno visoke temperature i tlakovi. Osnovna podjela plastomera je na kristalne i amorfne. Kristalni plastomeri iskazuju bolja svojstva otpornosti na otapala u usporedbi s amorfnima. Uz veću osjetljivost na otapala, amorfni plastomeri znatno su osjetljiviji na puzanje i zamorna opterećenja. Usmjerenost polimernih lanca daje svojstvo kristaličnosti polimeru [22]. Stupanj kristaličnosti ovisi u uvjetima izrade na način da, što je brzina hlađenja polimera veća, tijekom zagrijavanja dolazi do miješanja kristaličnih faza i postiže se struktura amorfnog viskoznog fluida. Poliketoni su skupina kristaličnih plastomera koji posjeduju iznimno visoku toplinsku otpornost. Polietereterketon (PEEK) najčešće je korišteni kristalični plastomer (do 40 % kristaličnosti) radi svojih dobrih mehaničkih svojstva i otpornosti prema otapalima i kiselinama. Polimeri bazirani na derivatima sulfata poput polieter sulfona (PES) ili polisulfona (PSU) amorfne su strukture i vatrootporni su. Samim time posjeduju odličnu otpornost na visoke temperature u pogledu očuvanja svojstva te su samogasivi [22].

3.2.2. Duromeri

Izrada duromernih matrica zahtijeva niže temperature što ujedno sa sobom vuče i niže proizvodne troškove u usporedbi s plastomerima. Tijekom proizvodnje niske su viskoznosti i stvaraju dobru adheziju s velikom većinom vrsta vlakana (dobro oplakuju vlakna). Epoksidne smole su amorfni polimeri koji su gelaste strukture pri visokim temperaturama za vrijeme kalupljenja, a prilikom hlađenja dolazi do ukrućivanja i poprimaju staklastu strukturu. Radna temperatura kompozitne konstrukcije kod kojih je došlo do polimerizacije pri sobnoj temperaturi je otprilike 50°C, no ona se može mijenjati ovisno o uključcima koji se dodaju unutar epoksi smola, tzv. otvrđivačima ili katalizatorima. Ukoliko je prevelik udio prisutnih katalizatora prilikom polimerizacije dolazi do toplinske degradacije matrice. Sami uključci mogu varirati svojstva matrice, primjerice, poboljšanje otpornosti širenju pukotina, promjena gustoće, smanjenje viskoznosti prilikom obrade i drugi, što je ujedno i glavna prednost epoksi smola. Osim modificiranja svojstva prema zahtjevima, proizvodljivost je sigurna zbog malog

udjela oslobođenih štetnih tvari, dobra kemijska otpornost i dobra dimenzijska stabilnost. Nedostaci epoksi smola vidljivi su u sporoj polimerizaciji, osjetljivost na vlagu i organske spojeve poput fenola te niska radna temperatura, a ujedno i osjetljivost na pojavu pukotina radi visoke krhkosti [20,22].

3.2.3. Metalne matrice

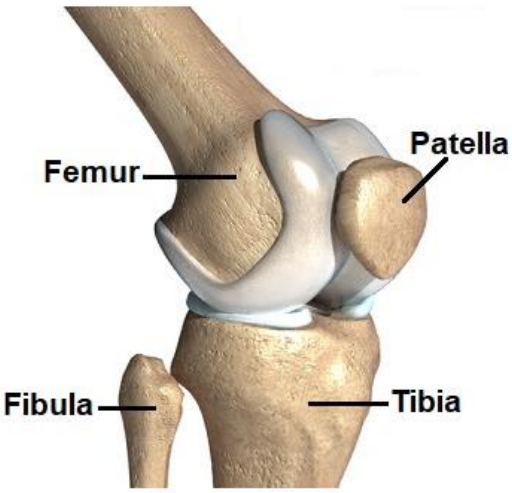
Iako je većina matrica danas polimernog tipa, kompoziti s metalnim matricama su se pojavili kasnije u primjeni. Uglavnom se koriste laki metali poput aluminija, magnezija i legura titanija i kompoziti s metalnom matricom sadrže iznimno dobra mehanička svojstva. Radna temperatura kompozitnih konstrukcija s metalnom matricom viša je od 700°C, ali kompleksnost izrade i vrlo visoka cijena razlog su smanjenog područja korištenja. Najveći problem prilikom izrade kompozita s metalnom matricom očituje se u nekompatibilnosti metala s vlaknima zbog kemijskih reakcija između vlakna i matrice što ograničava broj kombinacija spajanja metala s matricom. Vlakna koja se koriste za metalne matrice nazivaju se *Borsic*, odnosno borovo vlakno prevučeno silicijevim karbidom. Problem takvih vlakna je niski savitljivost i veliki promjer [20,22,27].

3.2.4. Ostale matrice

U današnje vrijeme razvijaju se C/C kompoziti, odnosno kompoziti koja je ugljična matrica ojačana ugljičnim vlaknima. Svoju su uporabu našli u proizvodnji kočnih sustava unutar automobila, kao i za avio industriju radi svojih svojstva poput niske gustoće, niskog koeficijenta temperaturne ekspanzije i visokih mehaničkih svojstva pri visokim temperaturama. Problem takvih materijala nastaje kod atmosfera zasićenih kisikom koji, u kombinaciji s visokom temperaturom degradira svojstva C/C kompozita radi nastajanja pora. Iz tog razloga znaju se koristiti keramičke matrice, primjerice silicij-karbid koji ima povećanu krhkost, pa tako i smanjenu otpornost na udarna opterećenja, ali može podnijeti puno više temperature. U sferi sporta ni C/C ni C/SiC kompoziti nisu korišteni [28,29].

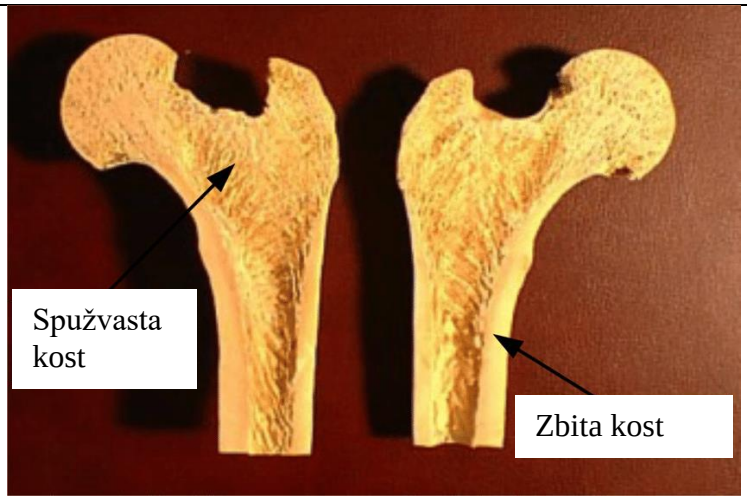
4. ANATOMIJA

Koljeno predstavlja najveći zglob unutar ljudskog tijela i jedan je od najvažnijih zglobova pošto omogućuje bipedalno kretanje. Ono povezuje, odnosno uzglobljuje kost potkoljenice cjevanicu (lat. *tibia*) i bedrenu kost (lat. *femur*) s koljenskom čašicom (lat. *patella*) što je vidljivo na Slici 19. Uz te tri kosti postoje i menisci, ligamenti i mišići koji omogućavaju samu pokretnost koljenog zgloba [30].

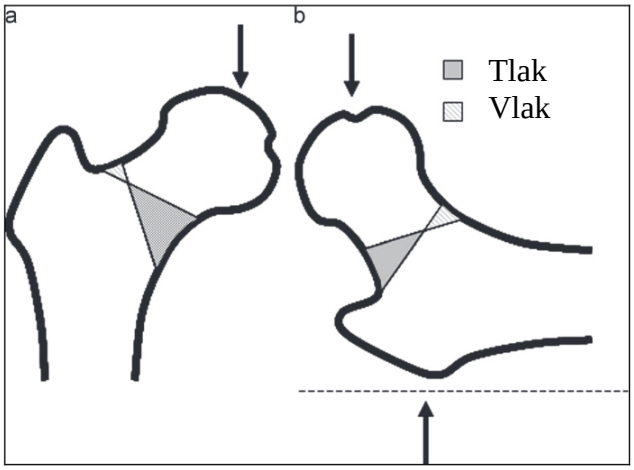


Slika 19. Koljeni zglob [31]

Bedrena kost jedna je od najdužih kostiju u ljudskom organizmu, a u presjeku (Slika 20.) se može uočiti kako je izgrađena od dvije različite vrste koštane tvari: kortikalne ili sabite i trabekularne ili spužvaste. Razlog takvog rasporeda i podjele kosti proizlazi iz adaptacije ljudskog tijela na vanjske podražaje te se može usporediti s kompozitnim materijalima izrađenim kao sendvič konstrukcije s jezgrom. Spužvasti dio kosti kao funkciju ima smanjenje mase uz što veću stabilnost, dok kortikalna kost pruža iznimno visoku krutost i otpornost na tlačna opterećenja u aksijalnom smjeru kako bi se ljudska težina mogla osloniti na nju. Prikaz opterećenja i naprezanja na bedrenu kost u stajaćem i ležećem položaju vidljiv je na Slici 21. i može se zaključiti kako je najveće opterećenje u vlaku i tlaku na krajevima kostiju [30,32].

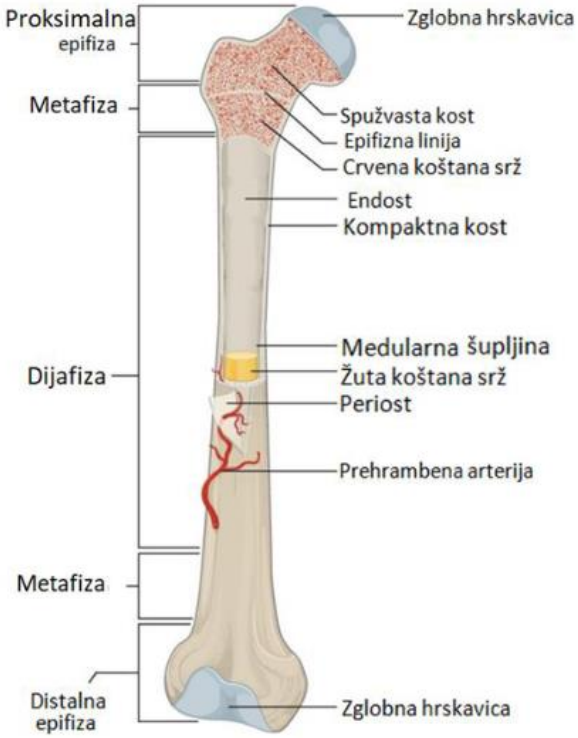


Slika 20. Presjek bedrene kosti [33]



Slika 21. Raspodjela sila na bedrenoj kosti [32]

Bedrena kost, kao i cjevanica, može se segregirati na tri različita dijela. Na sredini kosti nalazi se dijafiza, dok se na krajevima nalaze proksimalna i distalna epifiza ovisno o položaju gledajući od trupa ljudskog tijela. Vanjska strana dijafize izgrađena je od osteona, odnosno strukturnih jedinica kortikalne kosti postavljenih u smjeru kosti, dok unutrašnjost ispunjava žuta koštana srž. Žuta boja proizlazi iz masnih stanica (lipocita) unutar kojih je pohranjena energija. Epifize su s vanjske strane jednako građene kao i dijafiza, no s unutarnje strane ispunjene su mrežastim strukturnim jedinicama spužvaste kosti, tzv. trabekulama. Slika 22. prikazuje shematski prikaz podjele bedrene kosti na gradivne elemente. Distalna epifiza bedrene kosti, odnosno dio koji obuhvaća koljeni zglob izgrađen je od dva zaglavka (kondila) i međuzaglavničke jame prikazana je kao zglobna hrskavica na Slici 22.



Slika 22. Građa bedrene kosti [34]

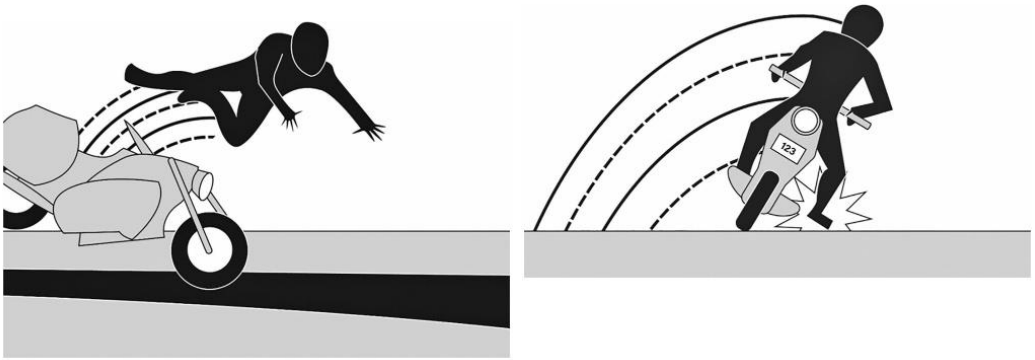
S donje strane koljenog zgloba nalazi se cjevanica koja uz listnu kost (lat. *Figula*) čini koštani sastav potkoljenice. Po svojem sastavu je cjevanica veća i strukturno čvršća od listne kosti te se ona uzglobljuje unutar koljenog zgloba. Građa cjevanice približno je jednaka bedrenoj kosti, no, razlikuje se u formi i izgledu. Glavna razlika vidljiva je u proksimalnoj epifizi goljenice koja je sastavljena od ravnih zglobnih ploha. Takve plohe dobro preuzimaju opterećenje, no u svrhu gibljivosti koljena, iznimno su nepovoljne. Kako bi se nadomjestila gibljivost, između bedrene kosti i cjevanice nalazi se vezivno-hrskavično tkivo, tzv. menisci. Menisci su C oblika i podsjećaju na polumjesec. S gornje strane su konkavnog oblika, dok su odozdo ravni kako bi se osiguralo što bolje nalijeganje na bedrenu kost i cjevanicu i smanjenje opterećenja prilikom gibanja unutar zgloba. Kako bi se maksimiziralo gibanje, između meniskusa i kostiju nalazi se sinovijalna tekućina koja ima svrhu „podmazivanja“ zglobova i smanjenja trenja.

S prednje strane koljenog zgloba nalazi se mala kost trokutastog oblika zvana patela ili iver (lat. *Patella*). Spada u grupu sezamskih kostiju, odnosno kostiju koje se nalaze unutar tetiva u zglobovima. Njen „vrh“ gleda prema dolje i služi za prihvat nastavka tetive kvadricepsa, dok se sa stražnje strane veže s distalnom epifizom bedrene kosti. Funkcija patele očituje se u povećavanju kraka sile i momenta sile koji se inducira prilikom fleksije u koljenom zglobu [30,34].

5. OZLJEDE

5.1. Ozljede prilikom motociklizma

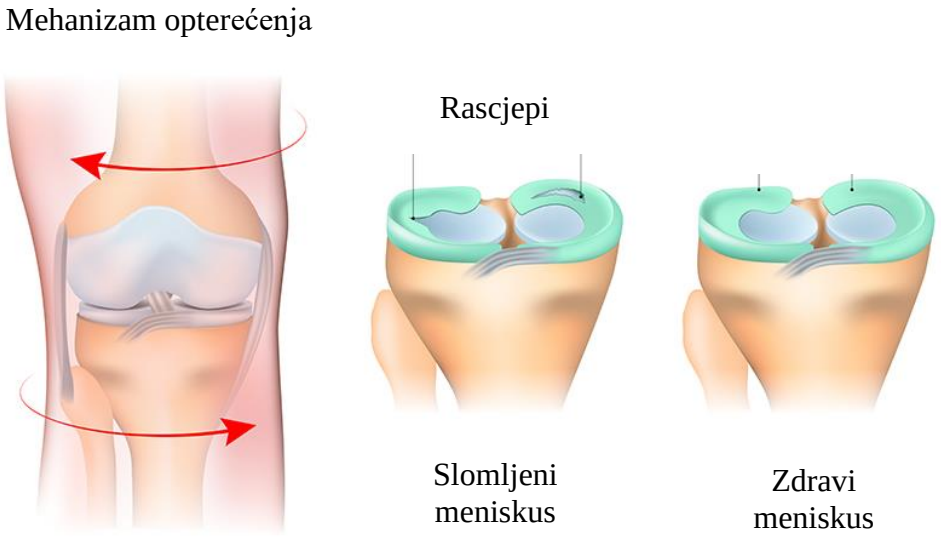
Najčešće i najozbiljnije ozljede i traume posljedica su motociklističkih nesreća u prometu, gotovo 5 milijuna godišnje na svjetskoj razini [30]. Razlog tome je što motocikli nemaju zaštitni pojas kao automobili i prilikom naglog usporenja motocikla vozači zadrže količinu gibanja i pri velikim brzinama nalijeću na tvrde plohe ili druge sudionike u prometu. Jako je važno za napomenuti kako starost također utječe na razinu ozbiljnosti ozljeda iz razloga što dolazi do degradacije svojstva ljudskog tkiva (gubitak elastičnosti) i kostiju (osteoporoza) s godinama. Prilikom pada, stopa ozbiljnosti ozljede ovisi o brzini, energiji kolizije, mjestu kontakta te o samom načinu sudara. Dva najučestalija načina pada s motocikla su frontalni sudar i gubitak balansa koji za posljedicu ima nekontrolirani pad motora na stranu. Kod frontalnog sudara moguće su dvije vrste ozljede koljena. U trenutku sudara moguće je da čovjek koljenima ili potkoljenicom udari u naslone za ruke na motociklu što može dovesti do porezotina koljena prilikom visokog faktora trenja između kože i kožnih ručki, iščašenja patele, i fraktura bedrene kosti ili cjevanice. Druga opasnija ozljeda nastupa u koliziji s kolnikom ili rubnikom što uz prethodno navedene ozljede može uzrokovati frakture zdjelice i iščašenja bedrene kosti iz zdjelice kao i gubitak kože i mišića do kostiju pod utjecajem trenja po abrazivnom kolniku. Slične posljedice ima i gubitak balansa, no u toj situaciji manja je vjerojatnost za smrtni slučaj jer motocikl djeluje kao apsorpcijsko sredstvo prilikom kolizije. Načini pada s motocikla vidljivi su na Slici 23 [32].



Slika 23. Načini pada s motocikla [35]

5.2. Ozljede prilikom sporta

Kod sportova osim ozljeda i fraktura prilikom pada ili prilikom direktnog udarnog opterećenja na potkoljenicu važno je napomenuti i ozljede prednaprezanjem, odnosno ozljede koje se mogu dogoditi prilikom nekontroliranog trzaja. Ukoliko osoba ne nosi zaštitnu opremu, osjet boli biti će znatno izraženiji što može dovesti do instinktivnog trzaja nogom, ili nepravilnog pada prilikom instinktivnog prihvata bolnog mjesta. Ozljede nastale prednaprezanjem nisu ozbiljne kao prilikom pada s motocikla, no u duljem vremenskom periodu mogu rezultirati iznimno štetnim učincima. Kod ovakvih ozljeda dug odmor i terapija jedini su oporavak, što za sportaše može značiti mnoge vremenske gubitke u svojoj profesionalnoj karijeri. Prilikom nepravilnog pada postoji mogućnost rupture meniskusa (Slika 24.) kao posljedica fleksijskog opterećenja u kombinaciji s rotacijom ukoliko je u pitanju sport poput nogometa gdje je obuća konstruirana na način da se ukopava u tlo radi boljeg prianjanja [30].



Slika 24. Ruptura meniskusa [36]

6. NUMERIČKI MODEL

U ovom poglavlju prikazan je model štitnika sa svojstvima materijala i vrstom konačnih elemenata korištenih za numeričku analizu kao i početni i rubni uvjeti. Osim štitnika prikazani su i početni i rubni uvjeti potrebni za kompozitnu ploču kako bi se prikazala validacija modeliranja oštećenja uzrokovanih udarnim opterećenjem. Za analizu koristi se *Abaqus/Explicit*_koji sadrži materijalne modele poput Hashin-ov kriterija popuštanja, kao i *Crushable foam* za simuliranje apsorpcijskog sloja.

6.1. Hashin-ov kriterij popuštanja

Za proračun čvrstoće vlaknima ojačanih kompozita, koristi se Hashin-ov kriterij inicijacije oštećenja s modelom propagacije oštećenja (eng. *Damage propagation*) koji se temelji na principima mehanike oštećenja kontiuuma (eng. *Continuum damage mechanics* - CDM) [37]. Unutar *Abaqus*-a, postoji značajka *Hashin damage* koja za numeričku analizu koristi Hashin-ov kriterij popuštanja. Ako se usporede Hashin-ov kriterij popuštanja s Tsai-Wu ili Tsai Hill-ovim kriterijem, Hashin-ov kriterij definira 4 načina popuštanja, vlačno/tlačno popuštanje vlakna i vlačno/tlačno popuštanje matrice. *F* u jednadžbama 1-4 predstavlja indeks popuštanja, donji indeks *f* označava vlakna, a *m* označava matricu, dok gornji indeksi *c*/*t* predstavljaju način opterećenja (tlak/vlak). Do popuštanja dolazi ukoliko su vrijednosti indeksa popuštanja veće ili jednake jedan. Jednadžbe (1-4) vrijede za glavni materijalni koordinatni sustav 1,2,3 gdje 1 predstavlja os u smjeru vlakna, a 2 i 3 su osi okomite na smjer vlakna. Sukladno tome *X* u jednadžbama označava čvrstoću sloja u smjeru vlakna, a *Y* je čvrstoća sloja okomita na smjer vlakna, dok su gornji indeksi sukladni indeksima popuštanja (tlak/vlak).

Vlačno popuštanje vlakna izraženo je preko

$$F_f^t = \left(\frac{\hat{\sigma}_{11}}{X^T}\right)^2 + \alpha\left(\frac{\hat{\tau}_{12}}{S^L}\right)^2. \tag{1}$$

Tlačno popuštanje vlakna izraženo je putem

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

Vlačno popuštanje matrice izraženo je preko

$$F_m^t = \left(\frac{\hat{\sigma}_{22}}{Y^T}\right)^2 + \alpha\left(\frac{\hat{\tau}_{12}}{S^L}\right)^2. \tag{3}$$

Tlačno popuštanje matrice izraženo je izrazom

$$F_m^c = \left(\frac{\hat{\sigma}_{11}}{X^T}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y^c}{2S^T}\right) - 1\right]\frac{\hat{\sigma}_{12}}{Y^C} + \left(\frac{\hat{\tau}_{12}}{S^L}\right)^2. \tag{4}$$

$\hat{\sigma}$ predstavlja efektivni tenzor naprezanja koji definira stanje naprezanja nakon pojave pukotina, odnosno oštećenja. Taj tenzor se dobiva umnoškom matrice oštećenja s nominalnim tenzorom naprezanja

$$\hat{\sigma} = \mathbf{M}\sigma.$$

Matrica oštećenja **M** određuje se preko

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \frac{1}{(1-d_f)} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{(1-d_m)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{(1-d_s)} \end{bmatrix}, \tag{6}$$

gdje *d* označava parametre oštećenja vlakna (*f*), matrice (*m*) i smična oštećenja (*s*) i definiraju se kao:

$$d_f = \begin{cases} d_f^t \; za \; \hat{\sigma}_{11} \geq 0 \\ d_f^c \; za \; \hat{\sigma}_{11} < 0' \end{cases} \tag{7}$$

$$d_m = \begin{cases} d_m^t \; za \; \hat{\sigma}_{22} \geq 0 \\ d_m^c \; za \; \hat{\sigma}_{22} < 0' \end{cases} \tag{8}$$

$$d_s = 1 - \left(1 - d_f^t\right)\left(1 - d_f^c\right)(1 - d_m^t)(1 - d_m^c). \tag{9}$$

Nominalno naprezanje za ortotropni materijal u slučaju ravninskog stanja naprezanja definirano je kao

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C}_{\boldsymbol{d}}\boldsymbol{\varepsilon}, \tag{10}$$

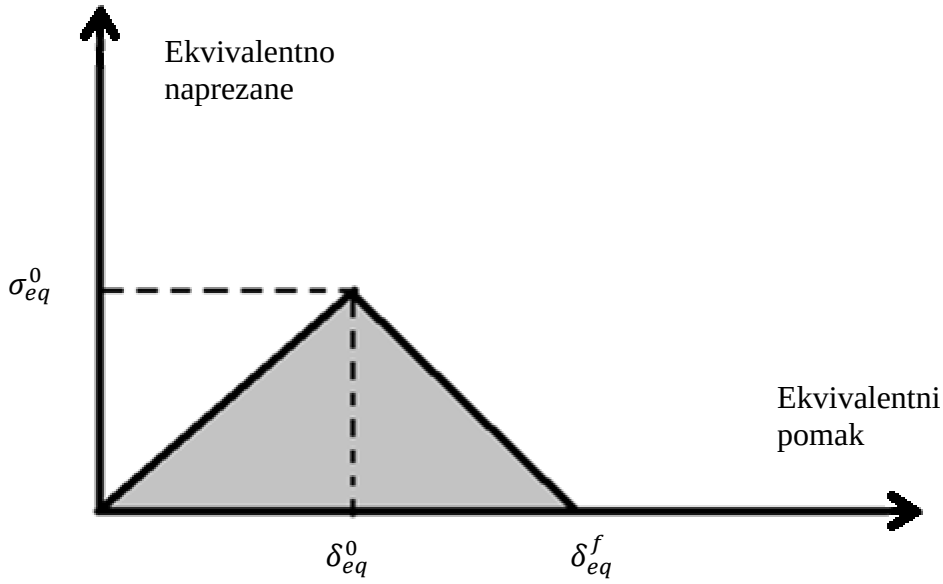
gdje $\mathbf{C}_{\boldsymbol{d}}$ predstavlja matricu elastičnosti s integriranim oštećenjima:

$$\boldsymbol{C_d} = \begin{bmatrix} (1-d_f)E_1 & (1-d_f)(1-d_m)\nu_{21} & 0 \\ (1-d_f)(1-d_m)\nu_{12} & (1-d_m)E_2 & 0 \\ 0 & 0 & (1-d_s)GD \end{bmatrix}, \tag{11}$$

u kojoj je *D* jednak

$$D = 1 - \left(1 - d_f\right)(1 - d_m)\nu_{12}\nu_{21}. \tag{12}$$

Hook-ov dijagram za vlaknima ojačane kompozite unutar *Abaqus*-a se numerički aproksimira. Na Slici 25. vidljiva je ta aproksimacija i prikazana su dva pravca, rastući i padajući. Rastući pravac predstavlja linearno elastično ponašanje konstrukcije, dok padajući pravac ukazuje na pojavu i propagaciju oštećenja. δ_{eq}^{0} na slici predstavlja ekvivlentni pomak pri kojem nastaju oštećenja, dok δ_{eq}^{f} označava ekvivalentni pomak pri kojem dolazi do popuštanja sloja.



Slika 25. Dijagram ekv. naprezanje – ekv. pomak za kompozite s vlaknima [37]

U jednadžbama (13-21) pojavljuje se tzv. Macaulay-ev operator koji je označen s < > a definira se kao

$$\langle a \rangle = (a + |a|)/2. \tag{13}$$

Ekvivalentni pomaci ovisni su o načinu popuštanja pa tako postoje različiti izračuni ovisno o četiri načina popuštanja. Ekvivalentni pomaci i naprezanja za načine popuštanja definirani su kao:

-vlačno opterećenja vlakna:

$$\delta_{eq}^{ft} = L^{C}\sqrt{\langle \varepsilon_{11} \rangle^{2} + \alpha \varepsilon_{12}^{2}}, \tag{14}$$

$$\sigma_{eq}^{ft} = \frac{\langle \sigma_{11} \rangle \langle \varepsilon_{11} \rangle + \alpha \tau_{12} \varepsilon_{12}}{\sqrt{\langle \varepsilon_{11} \rangle^{2} + \alpha \varepsilon_{12}^{2}}}, \tag{15}$$

-tlačno opterećenje vlakna:

$$\delta_{eq}^{fc} = L^C \langle -\varepsilon_{11} \rangle, \tag{16}$$

$$\sigma_{eq}^{fc} = \frac{\langle -\sigma_{11} \rangle \langle -\varepsilon_{11} \rangle + \langle -\sigma_{11} \rangle}{\langle -\varepsilon_{11} \rangle}, \tag{17}$$

-vlačno opterećenje matrice:

$$\delta_{eq}^{mt} = L^C \sqrt{\langle \varepsilon_{22} \rangle^2 + \varepsilon_{12}^2}, \tag{18}$$

$$\sigma_{eq}^{mt} = \frac{\langle \sigma_{22} \rangle \langle \varepsilon_{22} \rangle + \alpha \tau_{12} \varepsilon_{12}}{\sqrt{\langle \varepsilon_{22} \rangle^2 + \varepsilon_{12}^2}}, \tag{19}$$

-tlačno opterećenje matrice:

$$\delta_{eq}^{mc} = L^C \sqrt{\langle -\varepsilon_{22} \rangle^2 + \varepsilon_{12}^2}, \tag{20}$$

$$\sigma_{eq}^{mc} = \frac{\langle -\sigma_{22} \rangle \langle -\varepsilon_{22} \rangle + \tau_{12} \varepsilon_{12}}{\sqrt{\langle -\varepsilon_{22} \rangle^2 + \varepsilon_{12}^2}}. \tag{21}$$

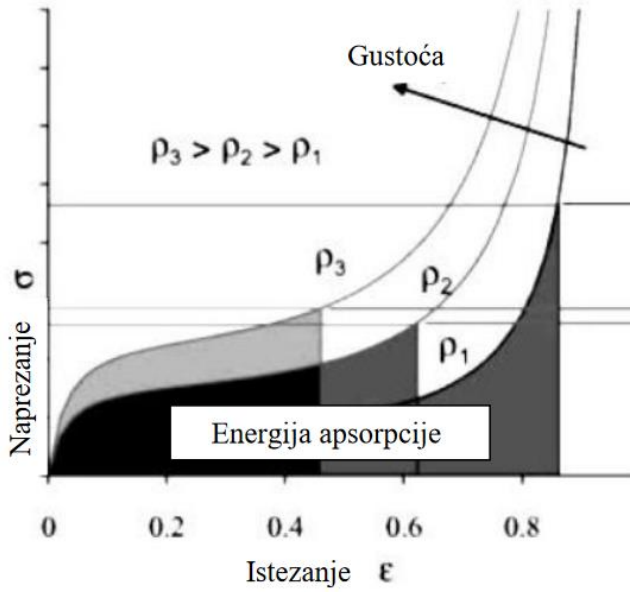
U izrazima za ekvivalentne pomake (14, 16, 18, 20), L^C definira karakterističnu duljinu konačnog elementa što je kod ljuskastih elemenata korijen njihove površine. Nakon određivanja vrijednosti izraza ekvivalentnog pomaka određuje se parametri oštećenja d koji su prethodno navedeni da određivanje matrice oštećenja i nominalnog naprezanja preko izraza

$$d = \frac{\delta_{eq}^{f}(\delta_{eq} - \delta_{eq}^{0})}{\delta_{eq}(\delta_{eq}^{f} - \delta_{eq}^{0})}. \tag{22}$$

Do popuštanja konačnog elementa dolazi nakon popuštanja svih materijalnih točaka unutar slojeva kompozita po vlačnom ili tlačnom popuštanju vlakna.

6.2. Crushable foam

Za analizu i simulaciju deformacija plastičnih pjena prilikom apsorpcije energije koristi se model *Crushable foam*. Glavna značajka tog modela očituje se u plastičnim, odnosno nepovrativim trajnim deformacijama [37]. Na Slici 26. vidljiv je kvalitativan dijagram naprezanje-istezanje za jezgre različith gustoća.

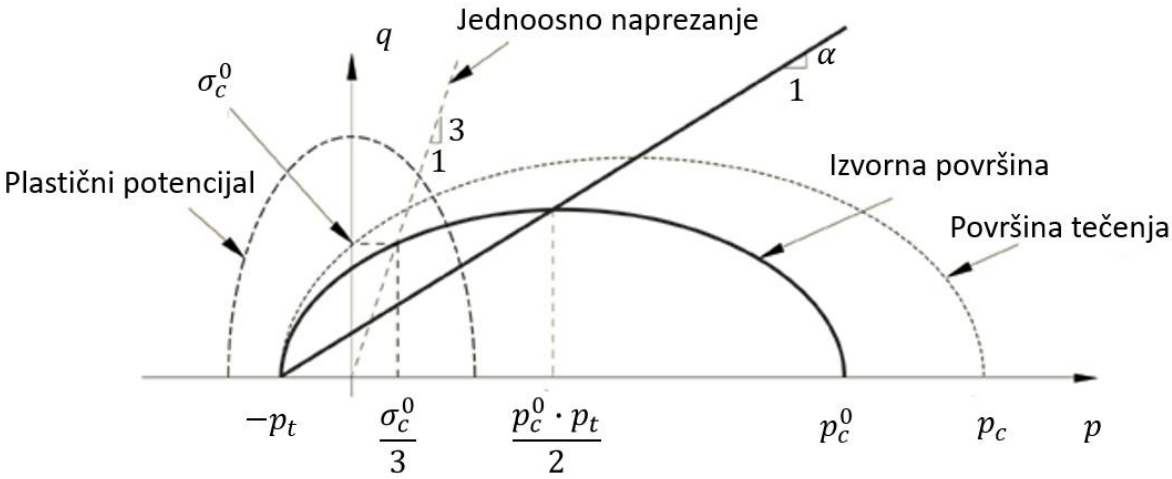


Slika 26. Dijagram napezanje – istezanje za pjenaste materijale [38]

Ako se promatraju krivulje, njihovo ponašanje može se diskretizirati i podijeliti unutar tri segmenta. Prvi segment prati normalan Hooke-ov zakon za jednoosno linearno elastično ponašanje materijala

$$\sigma = E \cdot \varepsilon. \tag{23}$$

Drugi segment predstavlja konstantan porast plastične deformacije pod jednolikim opterećenjem. Kako bi se odredio ovaj segment potrebno se naći površinu tečenja. Za određivanje površine tečenja uzima se von Misesov krug u ravnini u kojoj se nalazi devijatorsko naprezanje i stavlja se u eliptičku vezu s tlakom u *p-q* (meridialnoj) ravnini. Slika 27. prikazuje *Crushable foam* model.



Slika 27. *Crushable foam* model s očvršćenjem [37]

Površina tečenja prilikom volumnog očvršćenja izražena je kao

$$F = \sqrt{q^2 + \alpha^2(p - p_0)} - B = 0, \tag{24}$$

pri čemu je p srednje normalno naprezanje ili tlak,

$$p = -\frac{1}{3} tr\boldsymbol{\sigma}, \tag{25}$$

a q predstavlja naprezanje po von Mises-u

$$q = \sqrt{\frac{3}{2}\mathbf{S} : \mathbf{S}}. \tag{26}$$

S označava devijatorsko naprezanje

$$\mathbf{S} = \boldsymbol{\sigma} + p. \tag{27}$$

Vrijednost vertikale osi q označena s B dobiva se preko:

$$B = \alpha A = \alpha \frac{p_c + p_t}{2}. \tag{28}$$

A u prethodnoj jednadžbi označava vrijednost horizontalne p osi, dok α označava oblikovni faktor za određivanje veličine osi. Središte površine elipse označava se s p_0 i definira se kao

$$p_0 = \frac{p_c - p_t}{2}, \tag{29}$$

gdje p_c predstavlja granicu tečenja u hidrostatskoj kompresiji i on je strogo pozitivan, a p_t označava čvrstoću materijala u vlačnom hidrostatskom naprezanju. α je izražena preko početne

granice tečenja hidrostatske kompresije p_c^0, početne granice tečenja jednoosne kompresije σ_c^0 i čvrstoće hidrostatske kompresije p_t

$$\alpha = \frac{3k}{\sqrt{(3k_t + k)(3 - k)}}. \tag{30}$$

U jednadžbi (30), k predstavlja omjer kompresijskih granica tečenja koji po vrijednosti mora biti 0<k<3, dok k_t označava omjer hidrostatskih granica tečenja i mora biti strogo pozitivan

$$k = \frac{\sigma_c^0}{p_c^0}, \tag{31}$$

$$k_t = \frac{p_t}{p_c^0}. \tag{32}$$

Treći segment obuhvaća očvrsnuće materijala koje je uzrokovano gnječenjem ćelija apsorpcijskog sloja do razine kada više apsorpcija nije moguća. Pod pretpostavkom da je p_t konstantan, granica tečenja u kompresiji p_c mijenja se u ovisnosti s promjenom gustoće materijala prilikom tlačnog opterećenja. Ta promjena p_c definira se kao

$$p_c\left(\varepsilon_{vol}^{pl}\right) = \frac{\left[\sigma_c\left(\varepsilon_{axial}^{pl}\right)\left(\frac{1}{\alpha^2} + \frac{1}{9}\right) + \frac{p_t}{3}\right]}{p_t + \frac{\sigma_c\left(\varepsilon_{axial}^{pl}\right)}{3}}, \tag{33}$$

gdje je ε_{vol}^{pl} volumna plastična deformacija gnječenja, a $\varepsilon_{vol}^{pl} = \varepsilon_{axial}^{pl}$ ako je u pitanju jednoosna plastična deformacija gnječenja. Vrijednosti za očvrsnuće materijala se stoga iščitavaju se iz eksperimenta jednoosnog naprezanja [37].

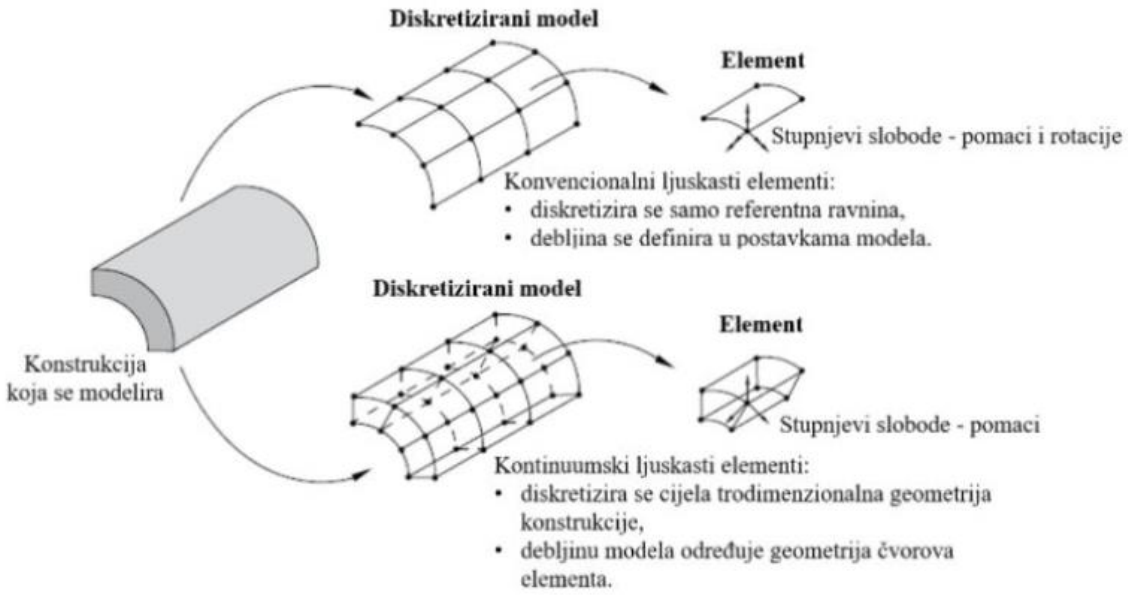
6.3. Konačni elementi

6.3.1. Heksaedarski kontinuirani ljuskasti elementi

Za simulacije kompozitnih konstrukcija poput *sandwich* konstrukcija ili konstrukcijskih panela u programskom paketu *Abaqus* koriste se mreže konačnih elemenata uglavnom izrađenih od heksaedarski kontinuiranih ljuskastih elemenata SC8R (eng. *Continuum shell*). Općenito se ljuskasti elementi dijele na konvencionalne i kontinuumske. Glavna razlika između tih dvaju vrsta elemenata je u tome da su konvencionalni elementi definirani, odnosno diskretizirani referentnom ravninom a kontinuumski diskretiziraju trodimenzionalnu geometriju. Debljine kod konvencionalnih ljuskastih elemenata zadaju se u postavkama modela, odnosno u *Property* izborniku pri definiranju materijala modela. S druge strane, kod kontinuumskih modela debljina je određena geometrijom čvorova. Iz tako definiranih mreža konačnih elemenata može se zaključiti kako su konvencionalni elementi bolji za simulacije modela malih debljina i

simuliranje linearnog ili nelinearnog modela kompozitne konstrukcije, dok su kontinuumski elementi bolji u pokazivanju točnih rezultata simulacija udarnih opterećenja između svakog sloja od kojeg je izrađen kompozitni laminat.

Razlike između tih dvaju vrsta elemenata vidljive su na Slici 28. [37].

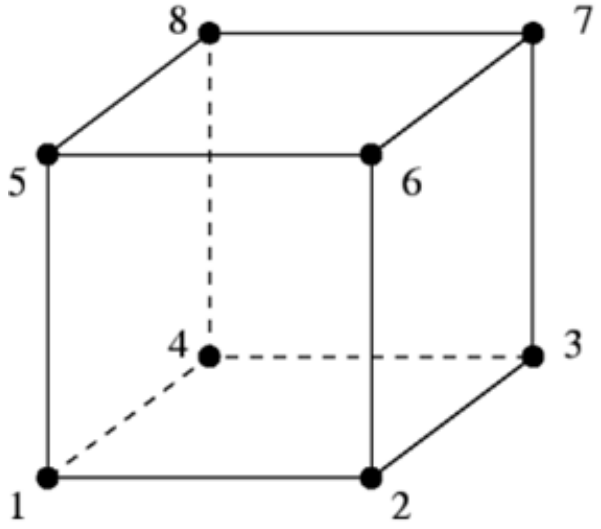


Slika 28. Prikaz ljuskastih elemenata [37]

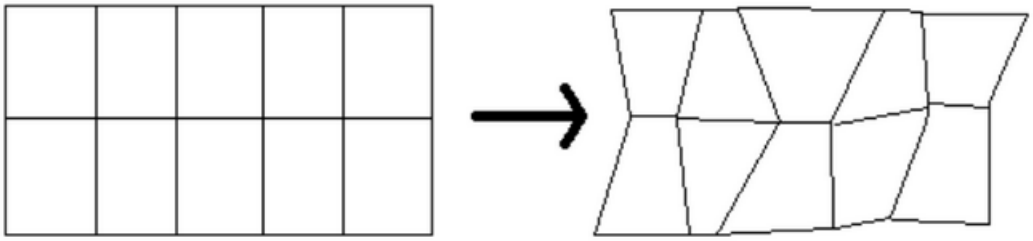
6.3.2. Linearni heksaedarski konačni elementi

Linearni heksaedarski čvorovi za čvrste materijale imaju oznaku C, dok se za simulaciju fluida koristi oznaka F. C3D8 najkorišteniji su elementi i definiraju se s 8 čvorova, odnosno njihovo ponašanje opisano je u sve tri dimenzije što je vidljivo na Slici 29. C3D8 elementi radi takve diskretizacije pokazuju visoku otpornost savijanju kod tankostjenih konstrukcija. Iz tog razloga za definiranje apsorpcijskog sloja koriste se konačni elementi s reduciranom integracijom, C3D8R elementi. Kod C3D8R elemenata se bolje i točnije očituju rezultati, no potrebno ih je puno više pošto se ponašanje elementa definira unutar jedne točke integracije elementa. Ukoliko je premalen broj takvih elemenata dolazi do stvaranja štetnog efekta koji se opisuje kao *Hourglass* efekt (Slika 30.). Njega karakterizira deformacija elementa bez deformacija cjelokupne mreže elemenata što znači da dolazi do deformacije elementa bez da se očituju

ikakva naprezanja, odnosno rezultati nisu točni. Kako bi se izbjegao taj efekt, kao rješenje se predlaže povećanje gustoće mreže konačnih elemenata [39,40].



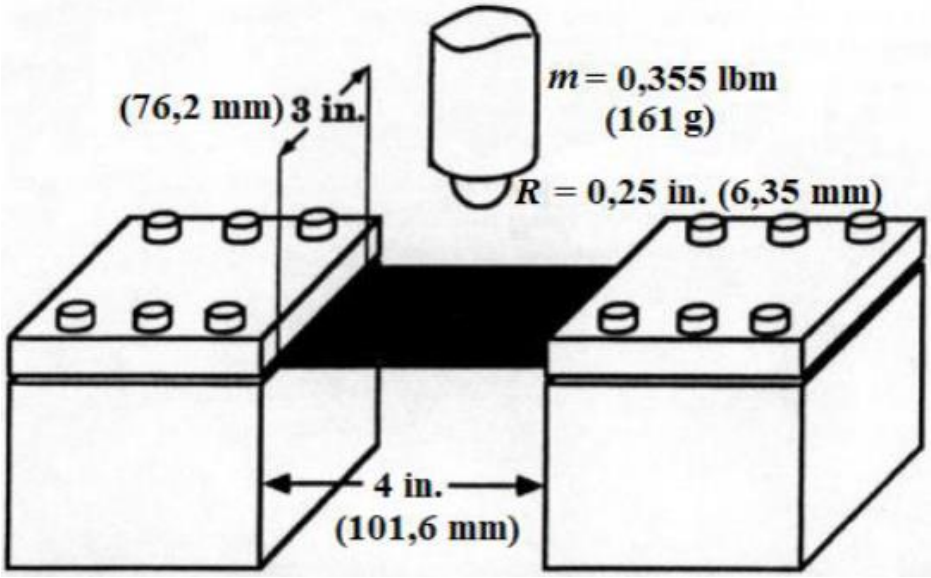
Slika 29. Prikaz *C3D8* elementa [39]



Slika 30. *Hourglass* efekt [40]

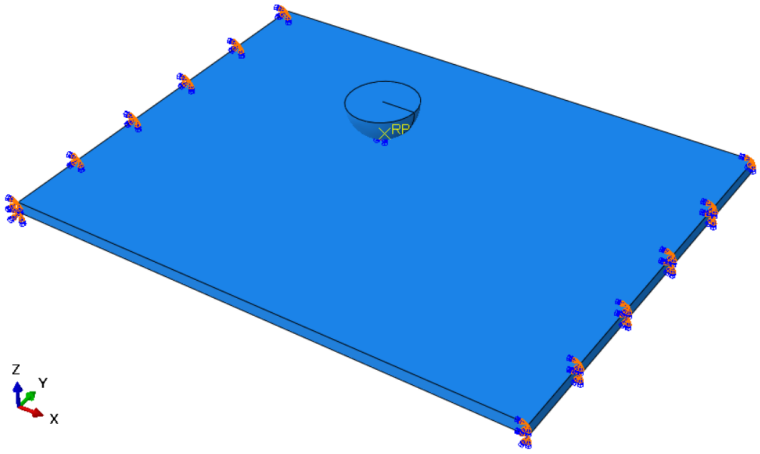
6.4. Numerički model kompozitne ploče

Način modeliranja oštećenja prilikom udarnih opterećenja za slojevite kompozitne konstrukcije unutar ovog rada validiran je modeliranjem kompozitne ploče iz literature [41]. U odabranoj literaturi provedeni su eksperimenti udarnog opterećenja s varijacijom brzine i broj i orijentacija slojeva. Rubni uvjeti i parametri definirani unutar *Abaqus*-a jednaki su onima korištenim u eksperimentu. Na Slici 31. prikazan je model kompozitne ploče korišten u eksperimentu u literaturi i vidljive su izmjere u anglosaksonskom i SI sustavu mjernih jedinica.

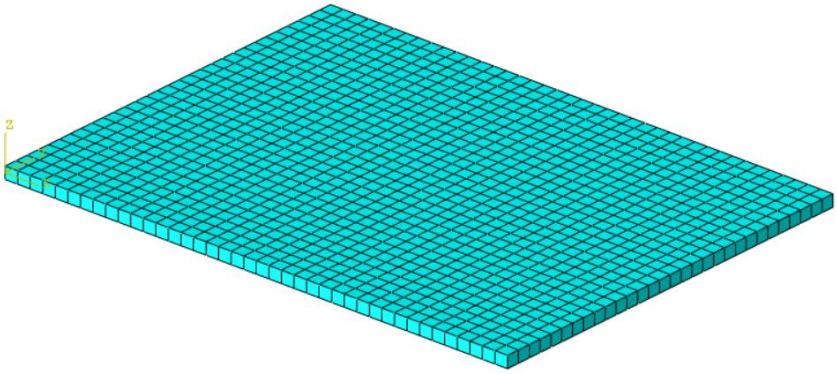


Slika 31. Model kompozitne ploče za ispitivanje udarnih opterećenja [41]

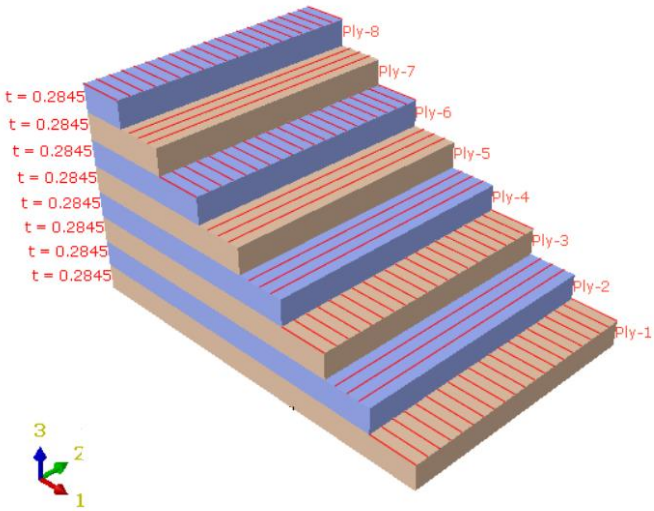
Sa Slike 31. vidljivo je kako je kompozitna ploča širine 101,6 mm i duljine 76,2 mm. Po širini je učvršćena u ispitni uređaj iz čega se mogu definirati rubni uvjeti za numeričku analizu. Debljina ploče postavljena je na 2,276 mm i izrađena je od osam slojeva. Samim time, debljina jednog sloja u tom slučaju iznosi 0,2845 mm. Udarno opterećenje uzrokovano je čeličnom polusferom koja udara u sredinu ploče. Polusfera ima sferni radijus 6,35 mm i u eksperimentu je udarala u ploču konstantnom brzinom od 3,7334 m/s. Polusfera je modelirana je kao analitičko kruto tijelo. Prikaz modela simulacije s rubnim uvjetima vidljiv je na Slici 32. Kompozitna ploča je napravljena od ugljik-epoksida T300/976 čija su svojstva dana u Tablici 4. Kontakt ploče i sfere modeliran je kao G*eneral contact*. Ukupno model sadrži 1200 SC8R elemenata koji su po svojoj debljini jednaki debljini ploče (Slika 32). Raspored slojeva za dani slučaj definiran je kao $[0/90/0/90]_s$ što se u literaturi još naziva i *Cross-ply* raspored slojeva i vidljiv je na Slici 33. U simulaciji se glavni materijalni koordinatni sustav podudara se s globalnim koordinatnim sustavom programa te je vrijeme trajanja simulacije postavljeno na 0,03 s



Slika 32. Prikaz početnih i rubnih uvjeta simulacije kompozitne ploče



Slika 33. Prikaz početnih i rubnih uvjeta simulacije i generirane mreže konačnih elemenata



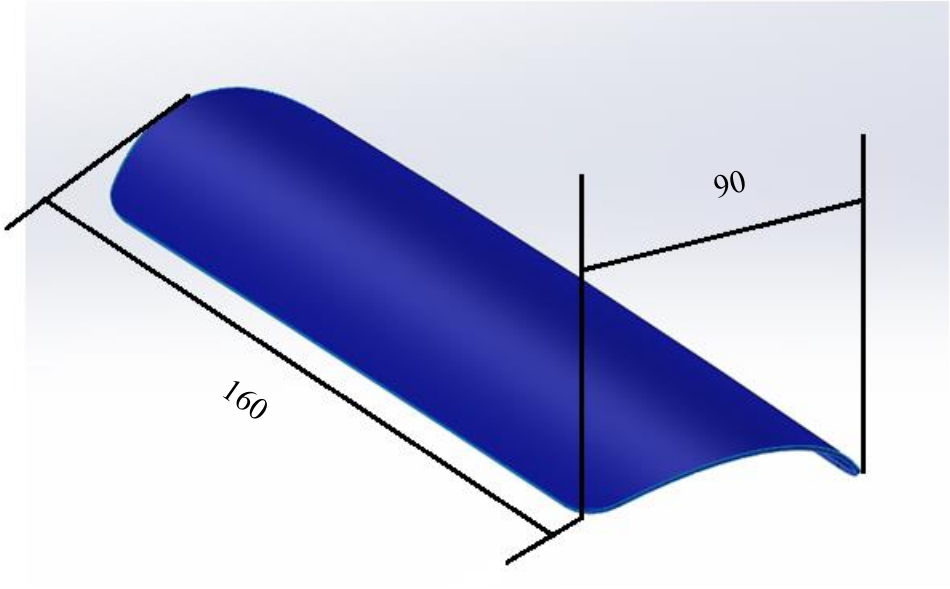
Slika 34. Raspored slojeva kompozitne ploče za validaciju numeričkog pristupa modeliranju oštećenja

Tablica 4. Mehanička svojstva kompozitne ploče [41]

Gustoća - ρ [kg/m^3]	1539
Young-ov modul u smjeru glavne materijalne osi 1 - E_1 [MPa]	130340
Young-ovi moduli u smjeru glavnih materijalnih osi 2 i 3 - $E_2 = E_3$ [MPa]	9655
Smični modul - $G_{12} = G_{13}$ [MPa]	5586
Smični modul - G_{23} [MPa]	4827
Poisson-ov faktor - ν_{12} [-]	0,29
Vlačna čvrstoća u smjeru vlakana - X_t [MPa]	1875,374
Tlačna čvrstoća u smjeru vlakana - X_c [MPa]	1330,688
Vlačna čvrstoća u ravnini sloja okomito na pravac vlakna - Y_t [MPa]	58,605
Tlačna čvrstoća u ravnini sloja okomito na pravac vlakna - Y_c [MPa]	270,2745
Smična čvrstoća - S [MPa]	99,974

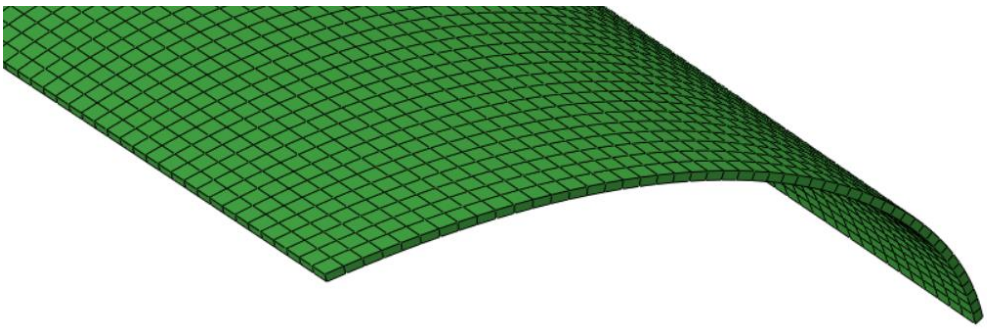
6.5. Numerički model vanjske ljuske štitnika

Vanjska ljuska debljine je 1 mm, vanjske izmjere 160x90 mm s radijusom zakrivljenosti od 6 cm, a njena geometrija je modelirana putem površina u programskom paketu *Solidworks*. Unutar *Abaqus*-a dobivena je ekstruzijom ljuskastih elemenata putem *Offset solid elements* značajke nakon generiranja mreže elemenata apsorpcijskog sloja kako bi se postigla maksimalna točnost nalijeganja tih dvaju modela. Model vanjske ljuske prikazan je na Slici 35.



Slika 35. Model vanjske čvrste ljuske 160x90 mm

Nadalje, kako je vanjska ljuska izrađena od 8 slojeva, uz prosječnu debljinu kompozitnih slojeva od 125 μm, u zbroju ukupna debljina vanjske ljuske iznosi 1 mm. Materijali korišteni u numeričkoj analizi za vanjsku ljusku su staklena i ugljična vlakna s epoksidnom smolom čija su svojstva vidljiva u Tablici 5. Vanjska ljuska sadrži 3822 SC8R elemenata koji su debljine 1 mm što znači da je jedan debljina mreže jednaka debljini elementa (Slika 36.). Glavni materijalni koordinatni sustav podudara se s globalnim.



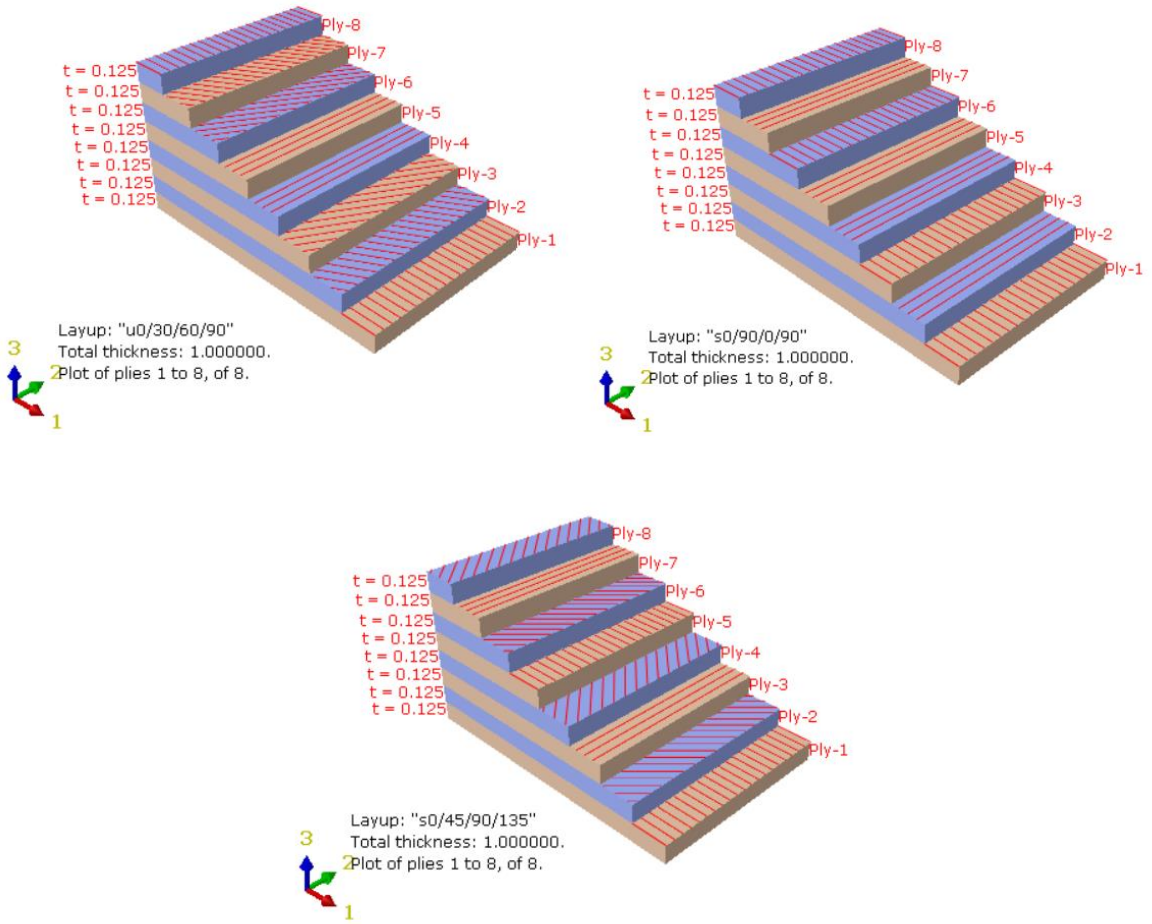
Slika 36. Mreža konačnih elemenata vanjske ljuske

Tablica 5. Svojstva epoksidne smole ojačane ugljičnim i staklenim vlaknima [42,43,44,45]

	Ugljična vlakna	Staklena vlakna
Gustoća - ρ [kg/m3]	1543	1800

Young-ov modul u smjeru glavne materijalne osi 1 - E_1 [MPa]	138000	30900
Young-ovi moduli u smjeru glavnih materijalnih osi 2 i 3 - $E_2 = E_3$ [MPa]	9000	8300
Smični modul - $G_{12} = G_{13}$ [MPa]	4800	2800
Smični modul - G_{23} [MPa]	3200	3000
Poisson-ov faktor - ν_{12} [-]	0,32	0,0866
Vlačna čvrstoća u smjeru vlakana - X_t [MPa]	1520	798
Tlačna čvrstoća u smjeru vlakana - X_c [MPa]	1520	480
Vlačna čvrstoća u ravnini sloja okomito na pravac vlakna - Y_t [MPa]	60	40
Tlačna čvrstoća u ravnini sloja okomito na pravac vlakna - Y_c [MPa]	246	140
Smična čvrstoća - S [MPa]	95	70
Vlačna energija loma u smjeru vlakana - G_{1t} [J/m^2]	85000	1290000
Tlačna energija loma u smjeru vlakana - G_{1c} [J/m^2]	106300	757000
Vlačna energija loma u smjeru matrice - G_{2t} [J/m^2]	1000	78000
Tlačna energija loma u smjeru matrice - G_{2c} [J/m^2]	1000	45500

Za raspored slojeva varirana su 3 slučaja: $[0/90/0/90]_S$, $[0/30/60/90]_S$ i $[0/45/90/-45]_2$ koji su vidljivi na Slici 37.

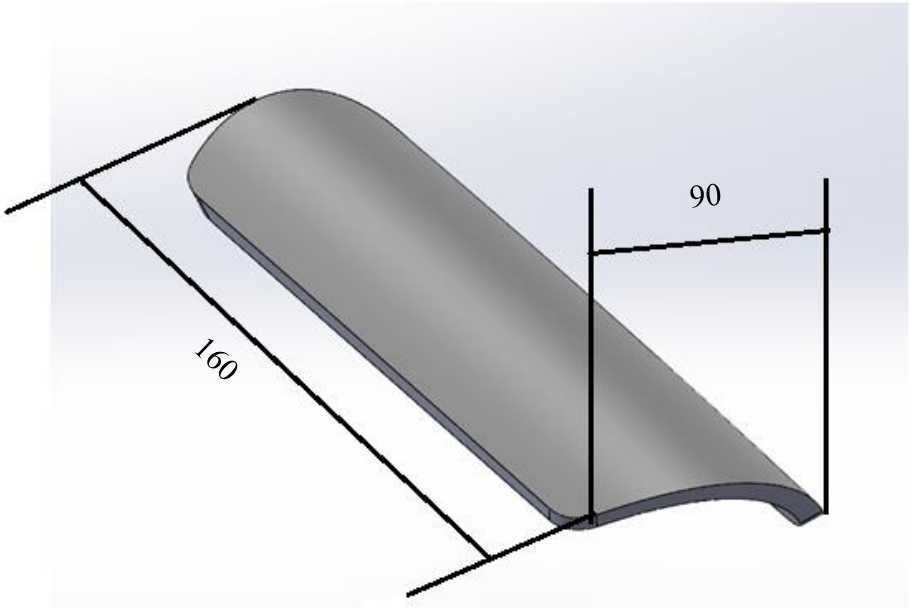


Slika 37. Raspored slojeva vanjske ljuske

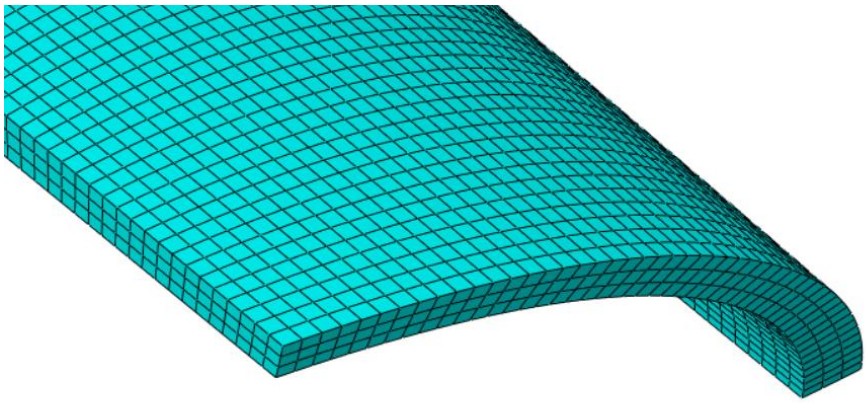
6.6. Numerički model apsorpcijskog sloja štitnika

Apsorpcijski sloj modeliran je na način da je na sredini malo deblji kako bi se moglo usporediti nalijeganje na okruglu cijev s nalijeganjem na potkoljenicom koja nije kružnog profila u presjeku. Debljina na proksimalnom i distalnom kraju modela je prilikom modeliranja postavljena na 5 mm, dok je sama sredina apsorpcijskog sloja 7 mm, a vanjske izmjere kao i kod modela ljuske iznose 160x90 mm. Radijus zakrivljenosti postavljen je na 6 cm što je dobiveno iz izmjerenog opsega potkoljenice iznosa 36 cm te je kružni odsječak koji zatvara postavljen na 84° što je manje od 90° kako bi ergonomski mogao prianjati na različite veličine potkoljenica. Gustoća materijala je jednolika i konstantna po cijelom modelu i za simulaciju su korištena dva materijala: poliuretan (PU) i ekspandirajući polipropilen (EPP) čija su svojstva prikazana u Tablici 6. Oba materijala mogu se opisati putem *Crushable foam* modela unutar

programskog paketa *Abaqus*. Slika 38. prikazuje model apsorpcijskog sloja. Apsorpcijski sloj napravljen je od 11 466 C3D8R konačnih elemenata, a po debljini je mreža generirana s tri elementa što je i prikazano na Slici 39.



Slika 38. Model apsorpcijskog sloja 160x90 mm



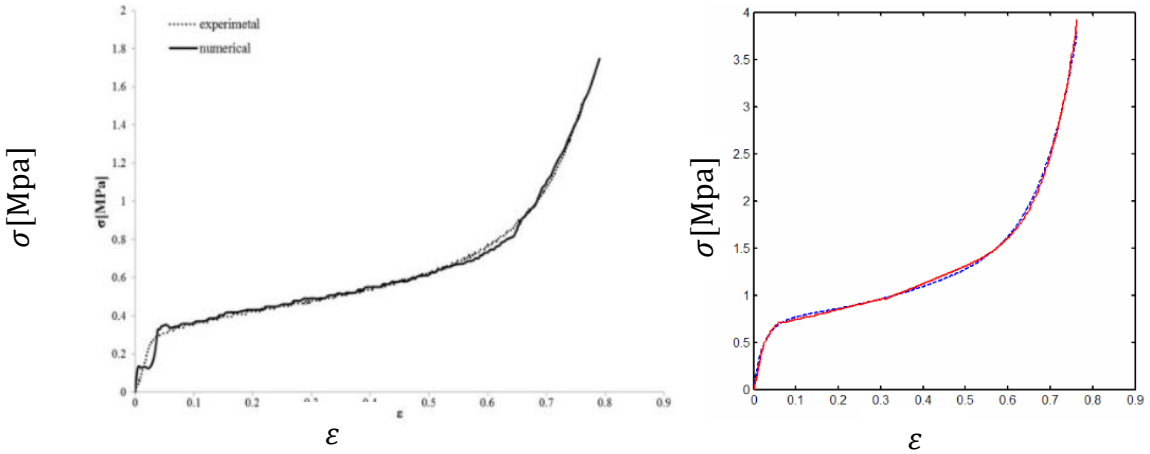
Slika 39. Mreža konačnih elemenata apsorpcijskog sloja

Tablica 6. Svojstva PU i EPP [46,47,48]

	PU	EPP
ρ [kg/m^3]	60	120
E [MPa]	7,5	16

ν [-]	0,0	0,3
k [-]	1,0	0,6
k_t [-]	0,1	2,0

Nelinearno ponašanje materijala, odnosno očvrsnuće dodaje se tablično preko vrijednosti očitanih sa Slike 40. vidljivi su u Tablici 7.



a) **b)**

Slika 40. Dijagram naprezanje - deformacija: a) EPP [49] b)PU [50]

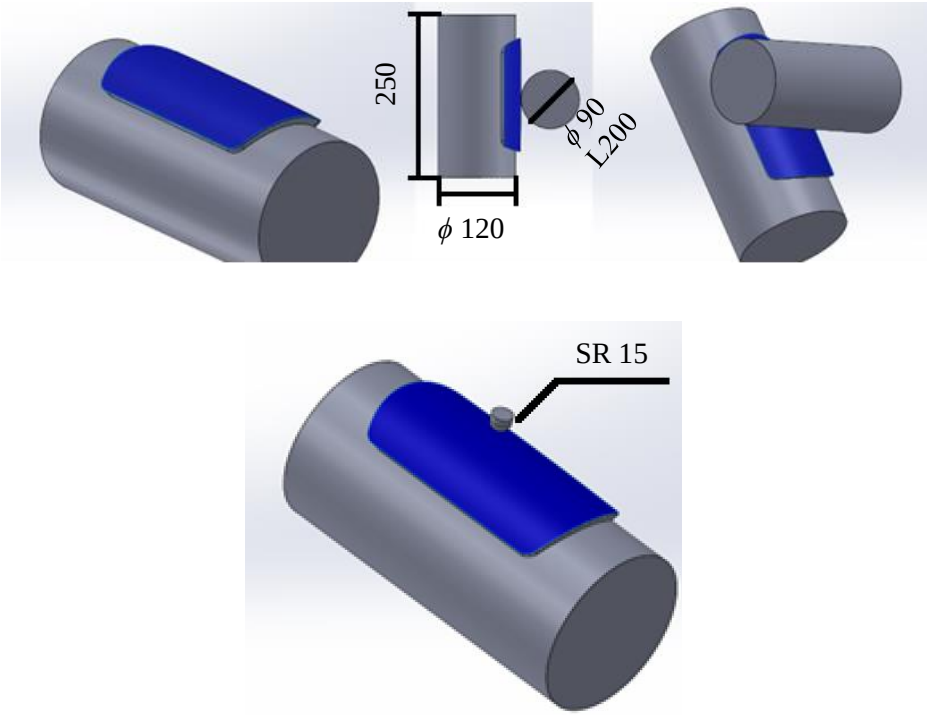
Tablica 7. Nelinearne vrijednosti očvršćenja EPP i PU pjene [49,50]

	EPP		PU	
	Granica tečenja	Jednoosne plastične deformacije	Granica tečenja	Jednoosne plastične deformacije
1	0,01	0	0,1	0
2	0,35	0,1	0,4	0,0025
3	0,5	0,4	0,7	0,01
4	0,6	0,5	0,8	0,04
5	1	0,7	1,2	0,06
6	1,6	0,8	1,9	0,07

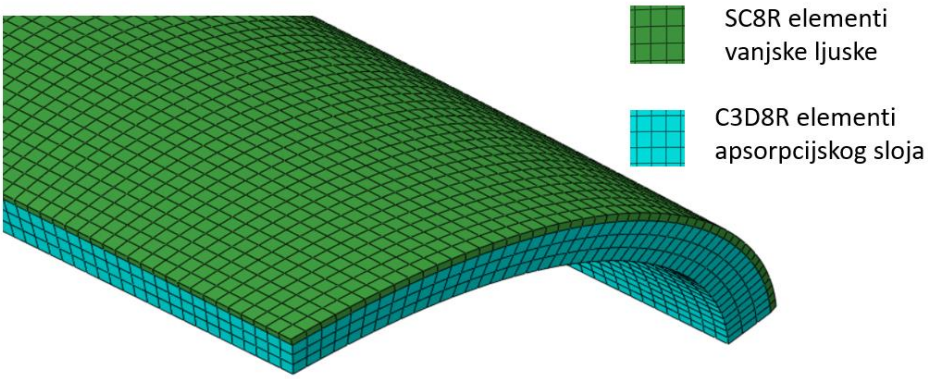
6.7. Početni i rubni uvjeti

Udarno opterećenje izvršavati će se na dva načina, preko cilindra dimenzija ø90x200 mm definiranog kao analitičko kruto tijelo koji predstavlja frontalni udar noge u štitnik i preko sfere radijusa SR15 mm koja predstavlja čep na kopačkoj, također definirane kao analitičko kruto

tijelo. Prema literaturi [51] uzete su vrijednosti inicijalnih uvjeta opterećenja. Masa cilindra i sfere iznosi 5,468 kg, a brzina nalijetanja na štitnih izražena je preko kinetičke energije koja je prema [51] bila 6 J. Vrijeme trajanja simulacije postavljeno je na 0,014 s. Štitnik sa strane apsorpcijskog sloja pozicionira se na cijev koja služi u svrhu sprječavanja pomaka i rotacije. Na mjestu kontakta štitnika s cijevi promjera 120 mm i duljine 250 mm mjeri se kontaktna sila te se u skladu sa standardom EN 13061: 2009 određuje zadovoljava li štitnik. Početni položaj udarača modeliran u programskom paketu *Solidworks* vidljiv je na Slici 41., dok je spoj mreža elemenata vanjske ljuske i apsorpcijskog sloja prikazan na Slici 42.



Slika 41. Prikaz simulacije udara cilindrom i sferom [mm]

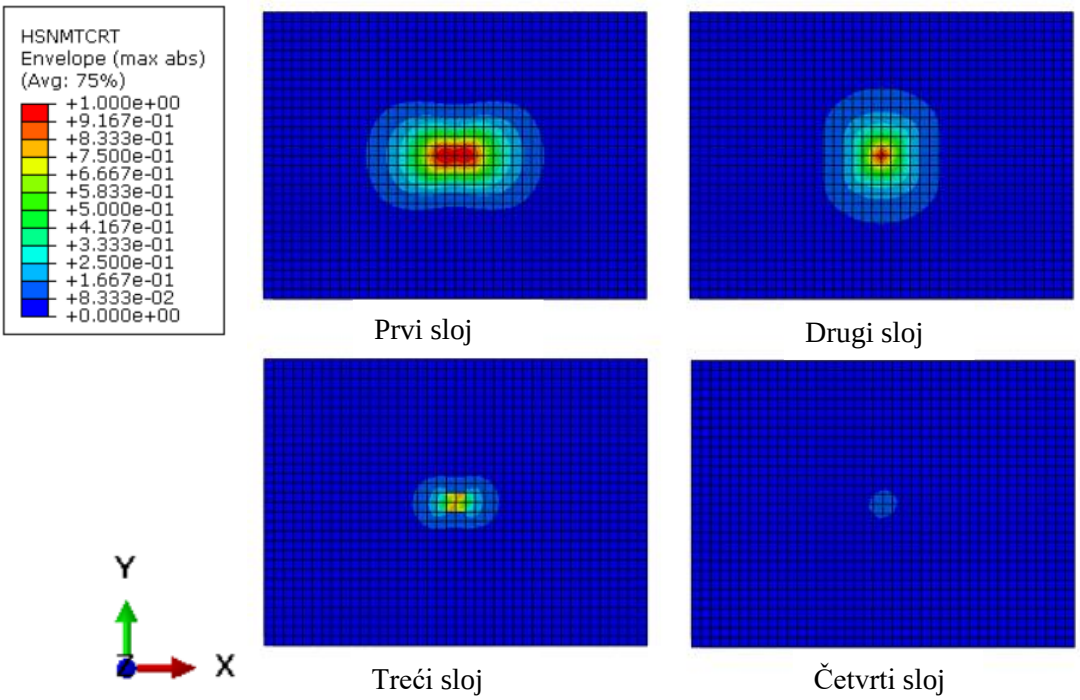


Slika 42. Spoj mreža konačnih elemenata za cijeli štitnik

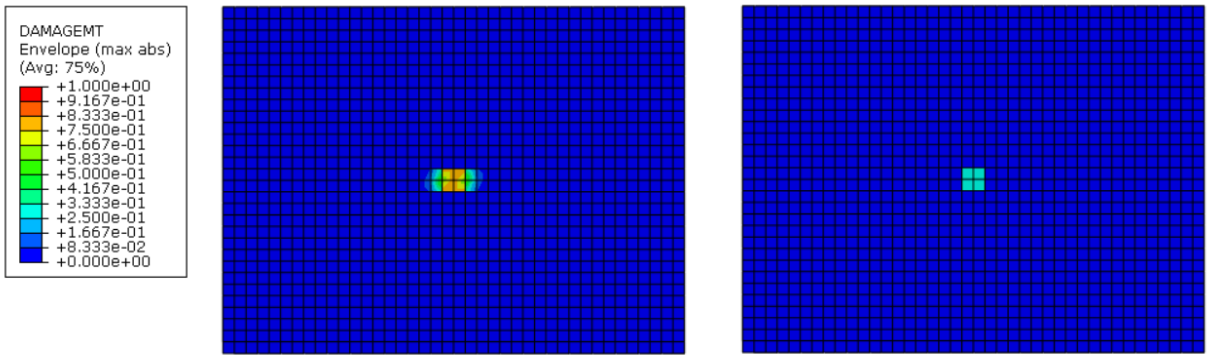
7. REZULTATI

7.1. Validacija modela oštećenja

Na Slikama 43. i 44. su vidljivi rezultati za HSNMTCRT (eng. *Hashin's matrix tensile damage initiation criterion*) i DAMAGEMT (eng. *Matrix tensile damage*) jer dolazi do popuštanja matrice u modeliranom problemu prema literaturi [41]. HSNMTCRT postiže maksimalnu vrijednost od 1 što pokazuje kako je došlo do pojave oštećenja na prvom i drugom sloju kompozitne ploče. Kao što je vidljivo na slici , na prvom sloju propagacija se odvija u smjeru *x*-osi što odgovara postavnom kutu od 0°, dok je na drugom sloju propagacija u smjeru *y*-osi. Osim takve propagacije, vidljiv je oblik kikirikija (eng. *Peanut shape*) koji je karakterističan za udarna opterećenja pri malim brzinama kako je i u literaturi [41]. Temeljem toga može se zaključiti kako je model dobro definiran i pouzdano pokazuje očekivane rezultate. Samo oštećenje propagira kroz prva dva sloja nakon čeka nestaje. DAMAGEMT će zadovoljiti uvjete udarnog opterećenja za 3,7334 m/s i njegova propagacija prestaje već nakon drugog sloja.



Slika 43. Kriterij inicijacije vlačnog oštećenja matrice vrijednosti za kompozitnu ploču po slojevima



Prvi sloj Drugi sloj

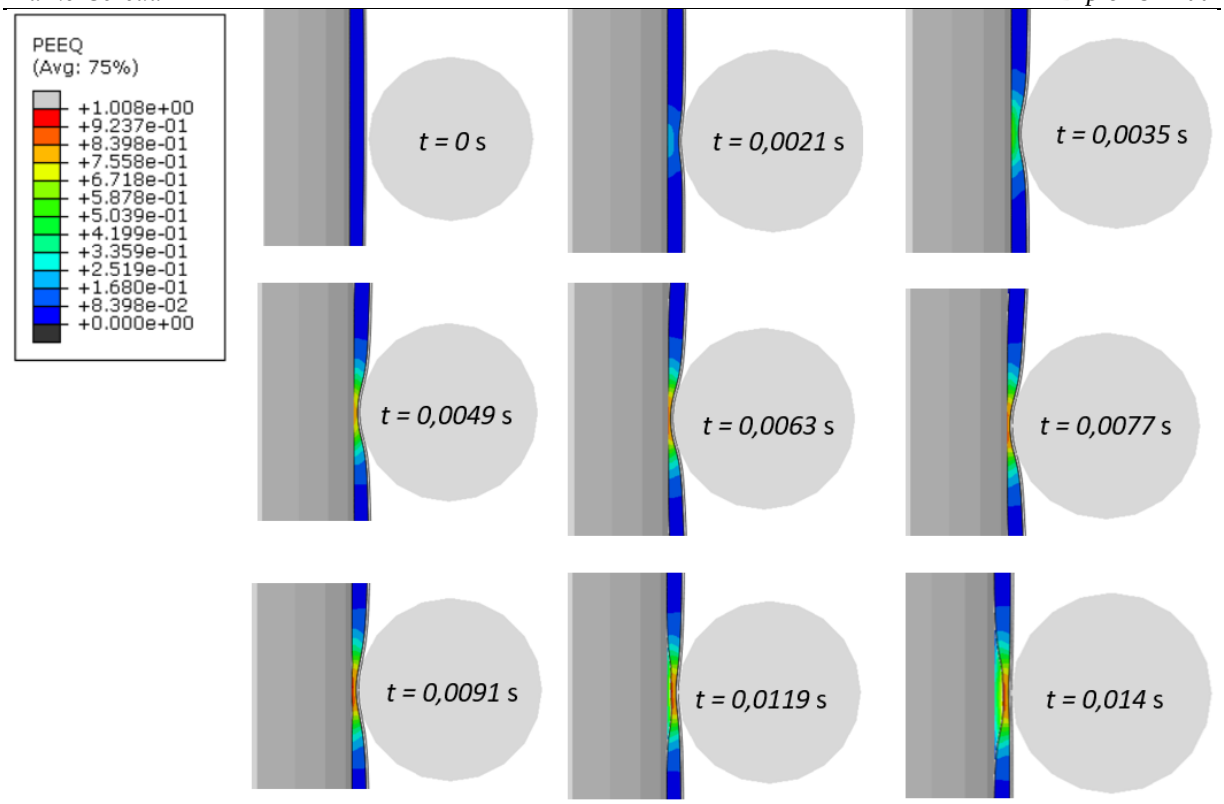
Slika 44. Parametar vlačnog oštećenja matrice za kompozitnu ploču po slojevima

7.2. Analiza štitnika

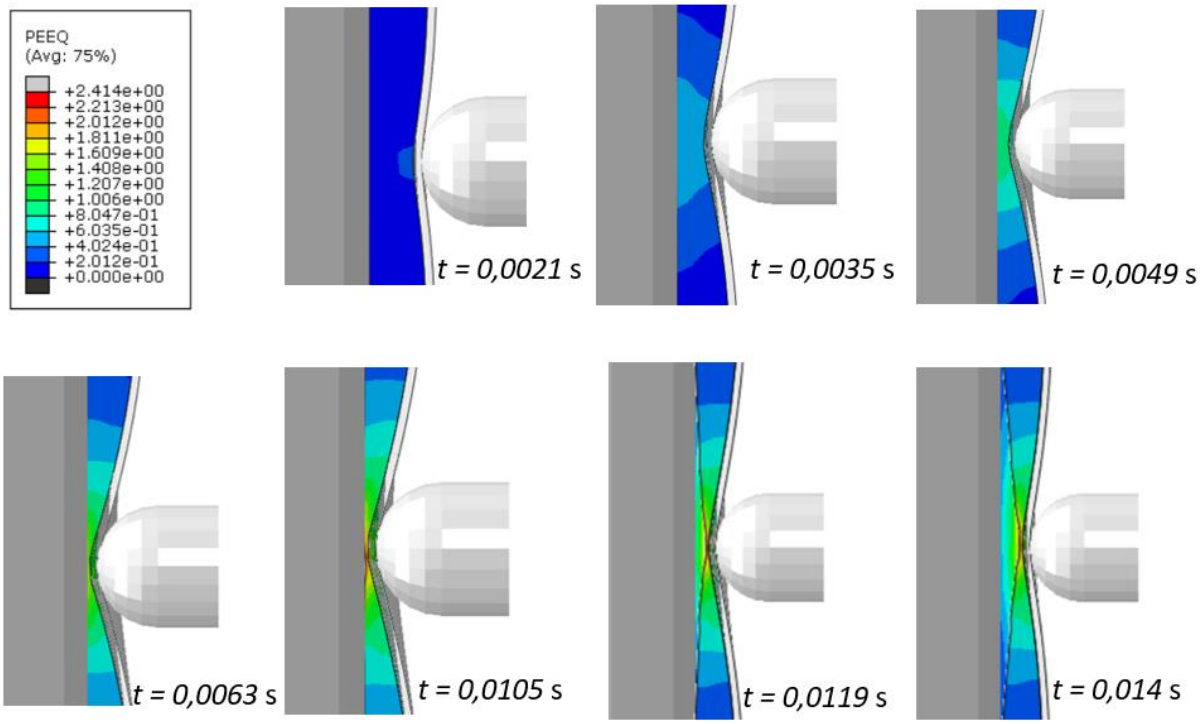
U ovom potpoglavlju prikazani su rezultati štitnika, odnosno njegovih sastavnih dijelova i njihove varijacije ovisne o kombinaciji materijala vanjske čvrste ljuske i apsorpcijskog sloja

Za početak prikazani su rezultati vanjske čvrste ljuske. Na vanjskoj ljusci rezultati kod kojih su vidljive najveće vrijednosti su DAMAGEMT, odnosno HSNMTCRT, S Mises i HSNFCCRT te će oni biti predstavljeni u ovom potpoglavlju.

Na Slici 45. prikazane su ekvivalentne plastične deformacije prilikom udara cilindričnog udarača. Vidljivo je kako dolazi do kompresije apsorpcijskog sloja do trenutka 0,0077 s nakon čega dolazi do elastičnog povrata do trenutka 0,0091 s. Nakon toga, kako su vanjska ljuska i apsorpcijski sloj spojeni skupa, povratom vanjske ljuske vidljiv je i odmak apsorpcijskog sloja od „noge“ i stvaranja zračnosti koja se povećava do 0,014 s. Slika 46. prikazuje ekvivalentne plastične deformacije za udarno opterećenje inducirano sferom i može se zaključiti kako manja dodirna površina sfere znatno više deformira apsorpcijski sloj, odnosno njegovo stanjenje je značajnije i više centralizirano. U trenutku 0,014 s još nije došlo do potpunog povrata sfere, no kako je vidljiv pomak apsorpcijskog sloja može se zaključiti kako je postignuta potpuna plastična deformacija.

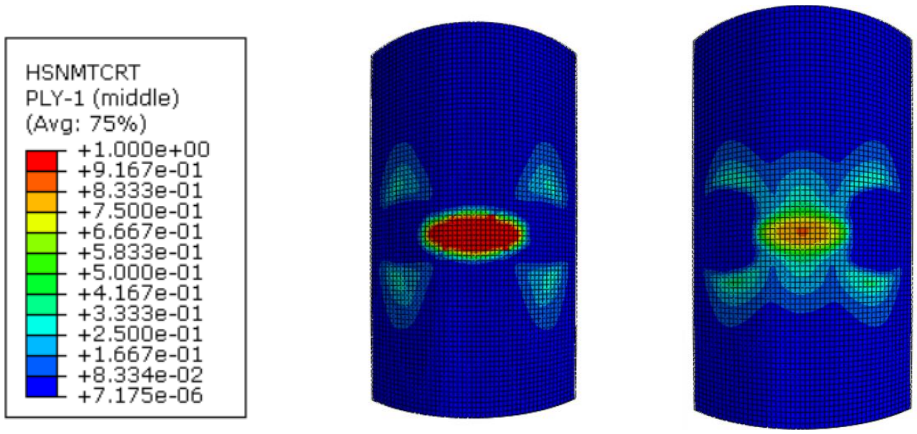


Slika 45. Prikaz ekvivalentnih plastičnih deformacija [-] kompozitnog štitnika izrađenog od EPP-a ojačanog staklenim vlaknima prilikom udara cilindrom



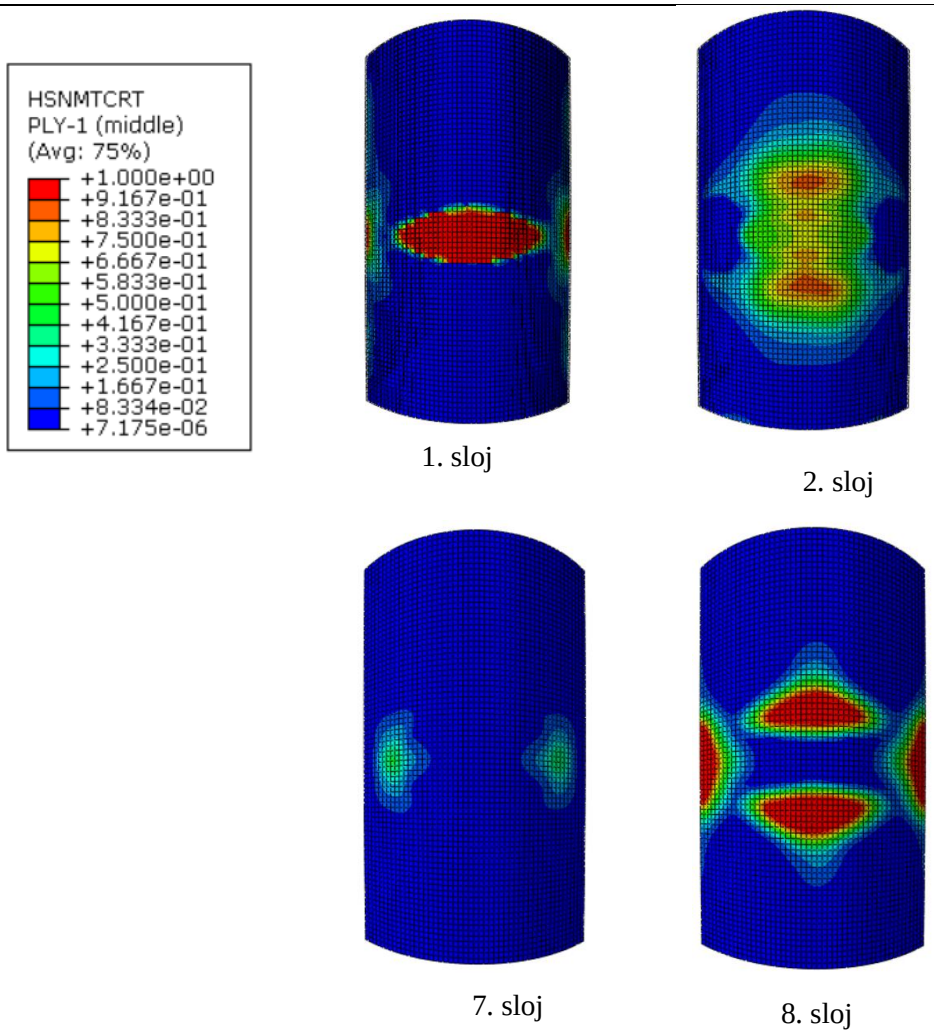
Slika 46. Prikaz ekvivalentnih plastičnih deformacija [-] kompozitnog štitnika izrađenog od EPP-a ojačanog staklenim vlaknima prilikom udara sferom

HSNMTCRT (vlačno popuštanje matrice prema Hashin-ovom kriteriju), koji je u narednim slikama prikazan za postavne kutove $[0/90/0/90]_s$ i opterećenje cilindrom, prikazuje prikazuju da dolazi do popuštanja matrice na prvom sloju kod kompozita izrađenih od ugljičnih vlakna što je vidljivo na Slici 47., dok će kod kompozita sa staklenim vlaknima doći do popuštanja u prvom i zadnjem sloju prikazanom na Slici 48. Ukoliko je došlo do popuštanja, dolazi do oštećenja matrice DAMAGEMT-a. Promjenom geometrije udarača na sferu, vrijednost HSNMTCRT-a prelazi 1 u svih slojevima, što znači da dolazi do oštećenja matrice po cijelom štitniku. Iz tog razloga je HSNMTCRT na Slici 49. prikazan *envelope* prikazu koji prikazuje maksimalnu vrijednost iznosa popuštanja neovisno o sloju za kompozite sa staklenim i ugljičnim vlaknima za raspored sloja $[0/45/90/-45]_2$.

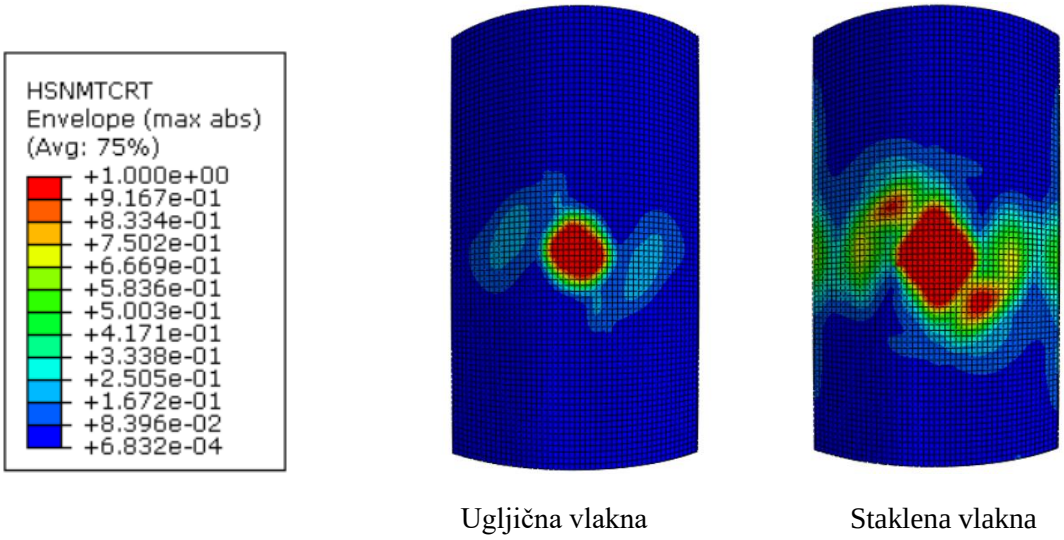


1. sloj 2. sloj

Slika 47. Vlačno popuštanje matrice prema Hashin-ovom kriteriju po slojevima ugljičnih vlakana za $[0/90/0/90]_s$ kod opterećenja cilindrom

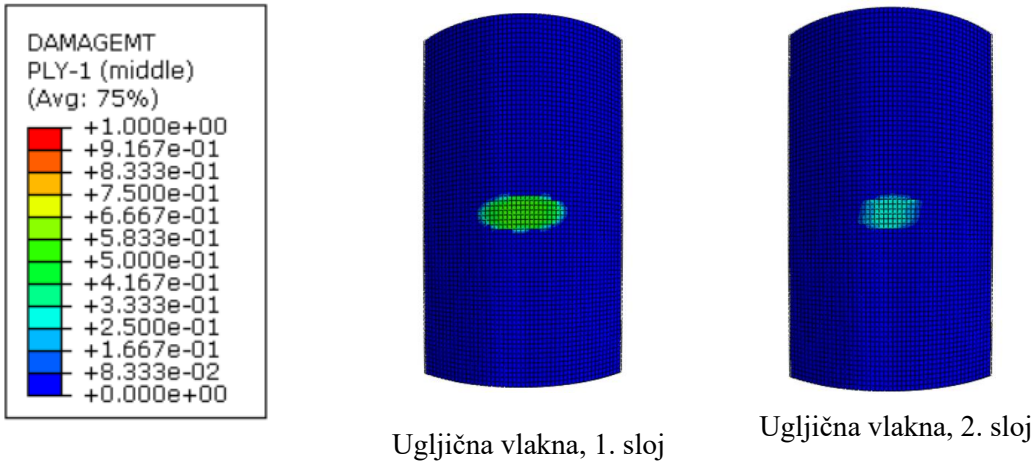


Slika 48. Vlačno popuštanje matrice prema Hashin-ovom kriteriju po slojevima staklenih vlakana za $[0/90/0/90]_s$ kod opterećenja cilindrom

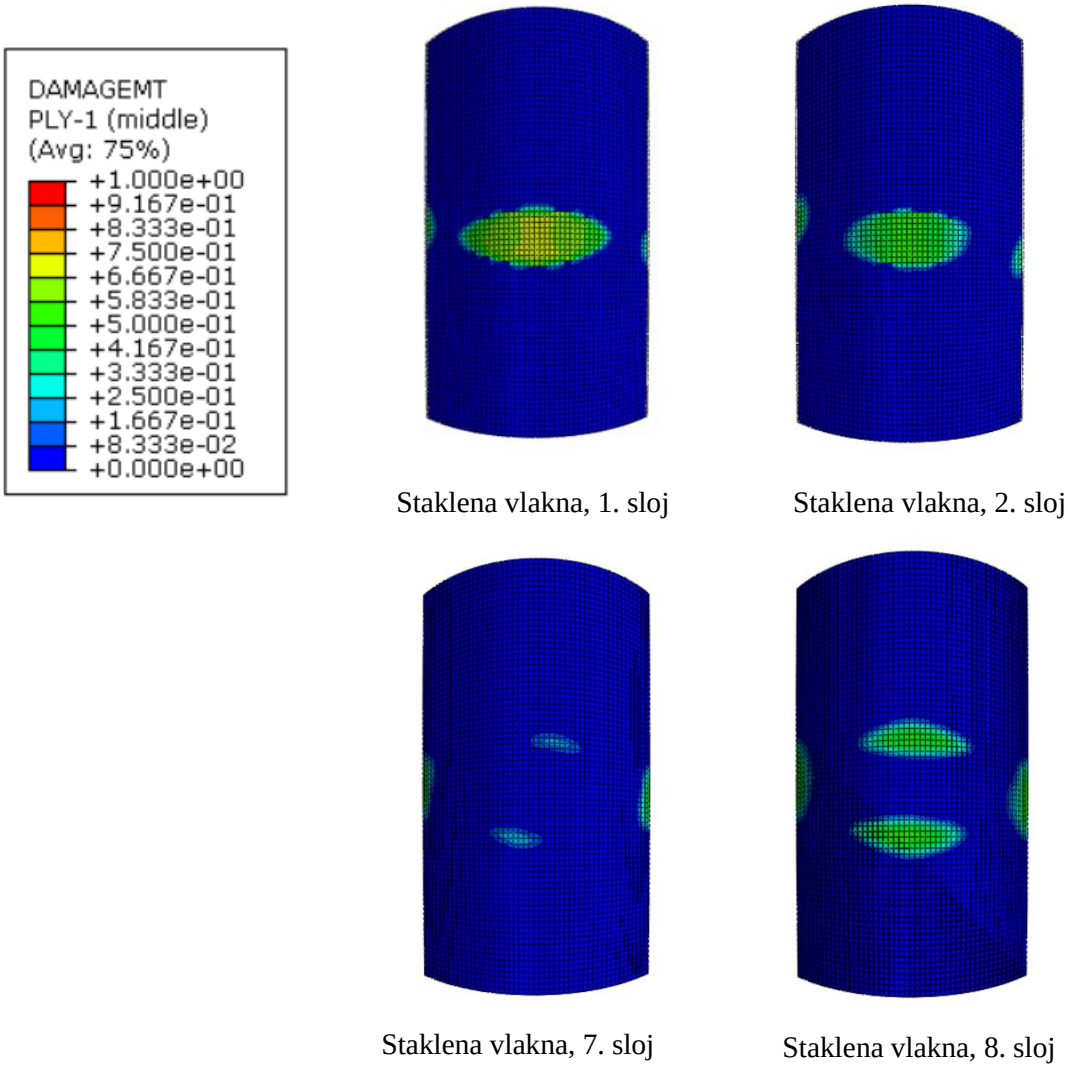


Slika 49. Vlačno popuštanje matrice prema Hashin-ovom kriteriju po slojevima vlakana za $[0/45/90/-45]_2$ kod opterećenja sferom

DAMAGEMT, odnosno parametar oštećenja matrice uslijed vlačnog opterećenja na Slici 50. prikazuje rezultate u skladu s HSNMTCRT-om, odnosno vidljiva su oštećenja samo na prva dva sloja kod kompozita s ugljičnim vlaknima. Ako se isto sagleda za staklena vlakna na Slici 51., veće su vrijednosti parametra oštećenja u prednja dva u usporedbi s kompozitom izrađenim od ugljičnih vlakna te su vidljiva oštećenja na stražnja dva sloja. Kod kompozita s ugljičnim, kao i kod kompozita sa staklenim vlaknima ne dolazi do proboja matrice. Na sredini ljuske nije došlo do oštećenja, a mijenjanjem rasporeda slojeva zamijećene su vrlo male ili nikakve promjene u popuštanju matrice.

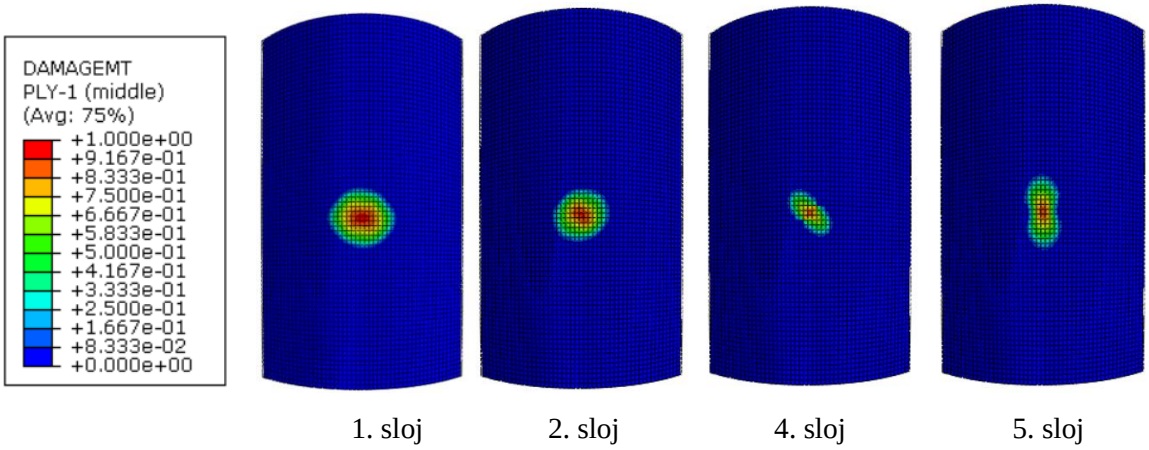


Slika 50. Kriterij inicijacije vlačnog oštećenja matrice po slojevima ugljičnih vlakana za $[0/30/60/90]_s$ kod opterećenja cilindrom

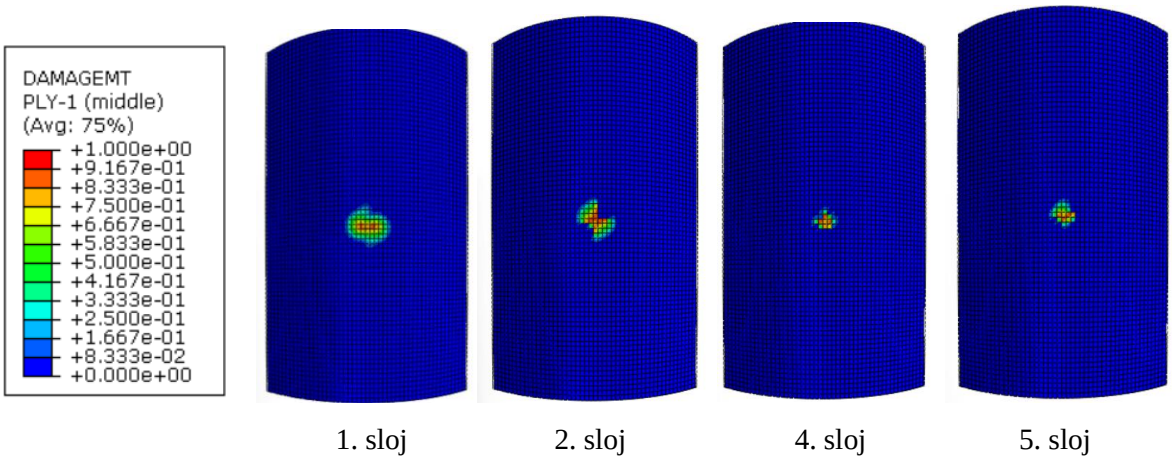


Slika 51. Kriterij inicijacije vlačnog oštećenja matrice po slojevima staklenih vlakana za $[0/30/60/90]_s$ kod opterećenja cilindrom

Za udarno opterećenje kod kojeg udarač ima oblik sfere, rezultati DAMAGEMT-a postižu puno veće vrijednosti i dolazi do proboja prva dva sloja kod staklenih vlakna, dok se u ostalim slojevima pojavljuju vrijednosti koje su relativno blizu vrijednosti proboja. S druge strane, kod kompozita s ugljičnim vlaknima nisu vidljivi elementi koji su poprimili vrijednost veću od 1 te se može uvidjeti kako je njihova površina opterećenih elemenata po slojevima znatno manja u usporedbi s kompozitom sa staklenim vlaknima, no, kod ugljičnih kao i kod staklenih vlakana vidljiva je propagacija oštećenja matrice po svim slojevima. Slike 52. i 53. prikazuju DAMAGEMT po slojevima za staklena i ugljična vlakna.

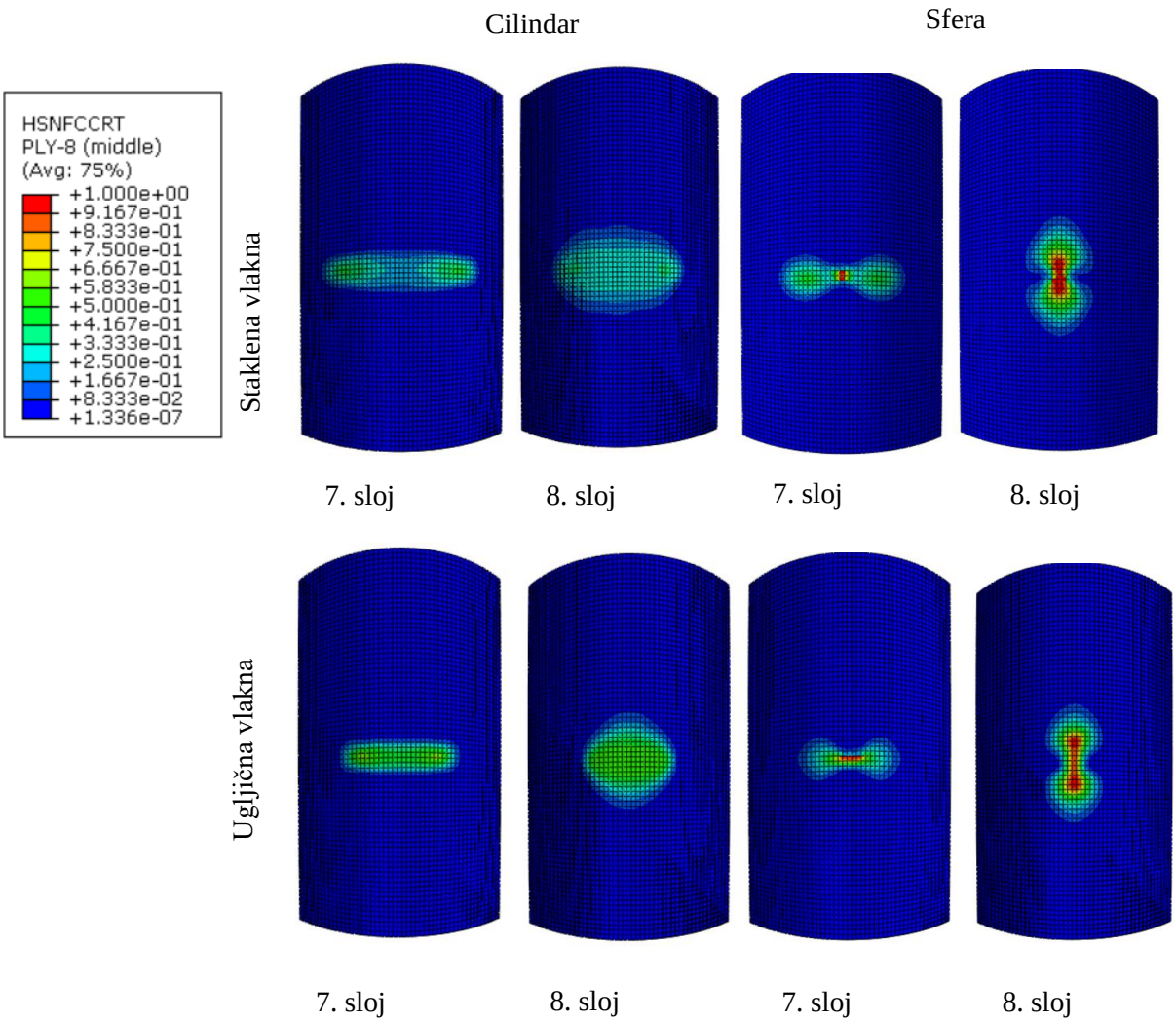


Slika 52. Kriterij inicijacije vlačnog oštećenja matrice po slojevima staklenih vlakana za $[0/30/60/90]_s$ kod opterećenja sferom



Slika 53. Kriterij inicijacije vlačnog oštećenja matrice po slojevima ugljičnih vlakana za $[0/30/60/90]_s$ kod opterećenja sferom

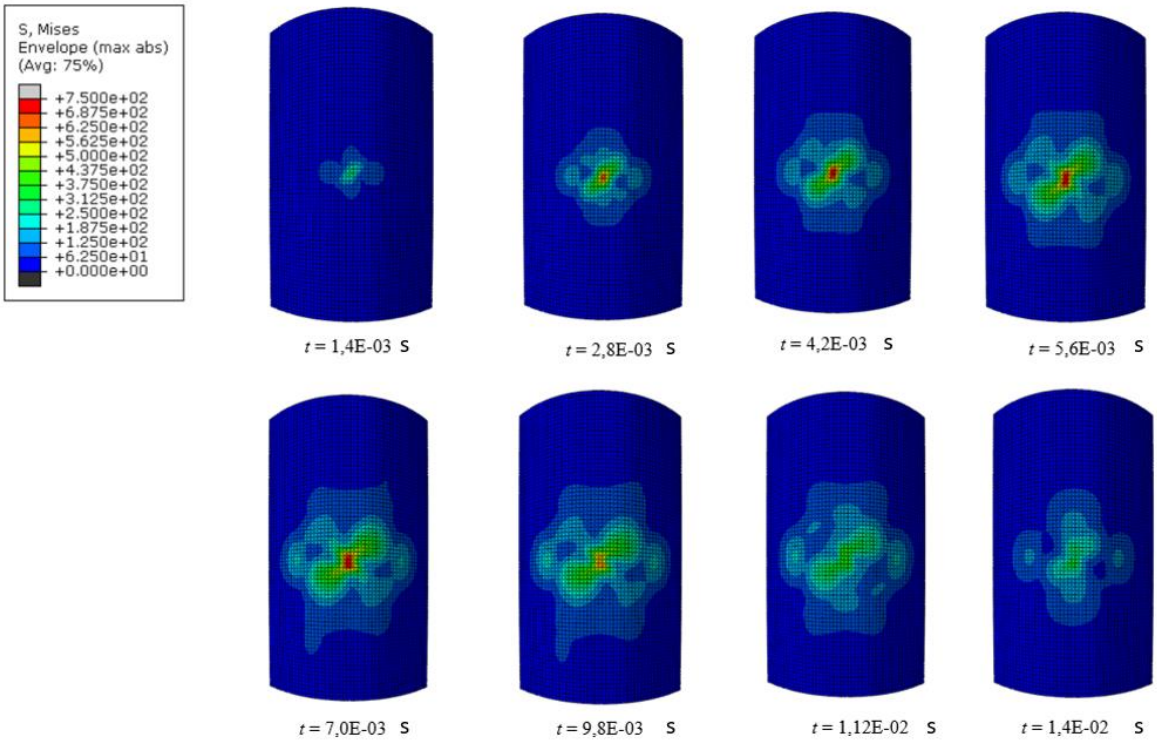
Tlačno popuštanje vlakna po Hashin-ovom kriteriju popuštanja (HSNFCCRT) prikazano je za raspored slojeva $[0/90/0/90]_s$. Iz prikaza sedmog i osmog sloja sa Slike 54. vidljivo je kako neće doći do popuštanja vlakna kod opterećenja s cilindrom ni kod staklenih ni kod ugljičnih vlakna, dok prilikom udara sferom popuštaju obje vanjske ljuske i dolazi do oštećenja. Jednaki rezultati po vrijednosti vidljivi su i za tlačno popuštanje vlakna po Hashin-ovom kriteriju (HSNFTCRT). Postavni kut vlakna za sedmi sloj je 90°, a s druge strane, za osmi sloj kut je 0° što je slučaj kod orijentacije prilikom udara sferom, dok s druge strane udar cilindrom nema jasno definiranu konfiguraciju zbog svoje površine udara. Kako je došlo do popuštanja dolazi i do inicijacije tlačnog oštećenja vlakna u 7. i 8. sloju prilikom udara sferom.



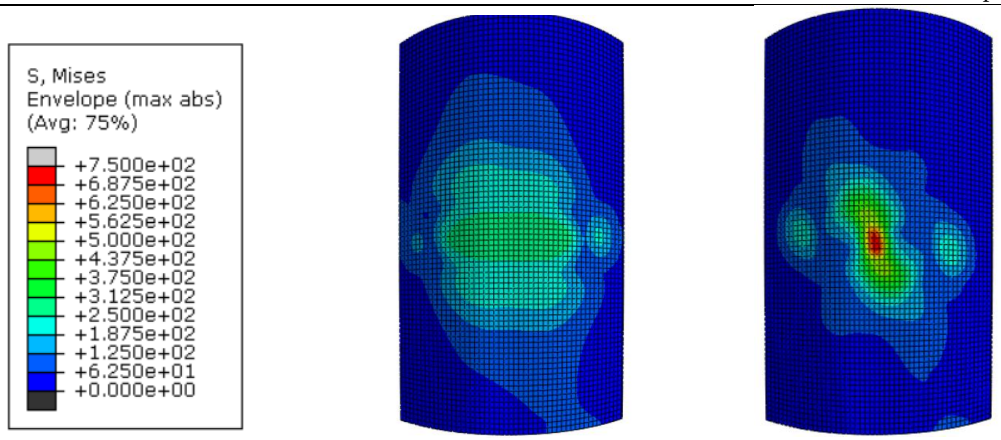
Slika 54. Tlačnog popuštanje vlakana po Hashin-ovom kriteriju za opterećenje cilindrom i sferom

Na Slici 55. prikazana je vremenska ovisnost ekvivalentnog naprezanja po von Mises-u za vanjsku ljusku sa staklenim vlaknima u *envelope* prikazu gdje je raspored slojeva $[0/45/90/-45]_2$ kroz razne trenutke simulacije, dok su na Slici 56. prikazane vrijednosti trenutku maksimalnih naprezanja za ostale kombinacije. Za vanjske ljuske prikazane na Slici 56., ljuske sa staklenim vlaknima prikazane su s rasporedom slojeva $[0/30/60/90]_s$ i $[0/45/90/-45]_2$, dok je za ugljična vlakna prikazan raspored slojeva $[0/30/60/90]_s$. Na slici je vidljivo kako staklena vlakna prilikom udara sa sferom imaju dva puta manji iznos naprezanja u usporedbi s kompozitima izrađenim od ugljičnih vlakna iz razloga što se prije inducira oštećenje matrice. Nadalje, vidljivo je kako se ta vrijednost smanji još dva puta ukoliko je udar induciran cilindrom, što nije slučaj kod ugljičnih vlakna koja imaju podjednake vrijednosti naprezanja neovisno o načinu udarnog opterećenja. Promjena rasporeda slojeva nema velikog utjecaja na

vrijednosti naprezanja. Kod kompozita izrađenim od staklenih vlakna, prilikom oba načina opterećenja maksimalna vrijednost ekvivalentnih naprezanja postiže se u 0,0077 s, dok se kod ugljičnih vlakna maksimalna vrijednost postiže u 0,0063 s što se može povezati s prethodno navedenim zaključkom kako ugljična vlakna mogu podnijeti veća opterećenja prije pojave oštećenja. Po iznosu su vrijednosti ekvivalentnog naprezanja prilikom udara cilindrom za staklena vlakna 317,19 MPa, a za ugljična vlakna taj je iznos 1382,32 MPa. S druge strane iznos za udar sferom za iznosi 743,2 MPa za staklena dok za ugljična vlakna ta vrijednosti iznosi 1482,9 MPa.



Slika 55. Prikaz ekvivalentnih von Mises naprezanja [MPa] vanjske ljuske kroz vrijeme za staklena vlakna opterećena udarom sferom

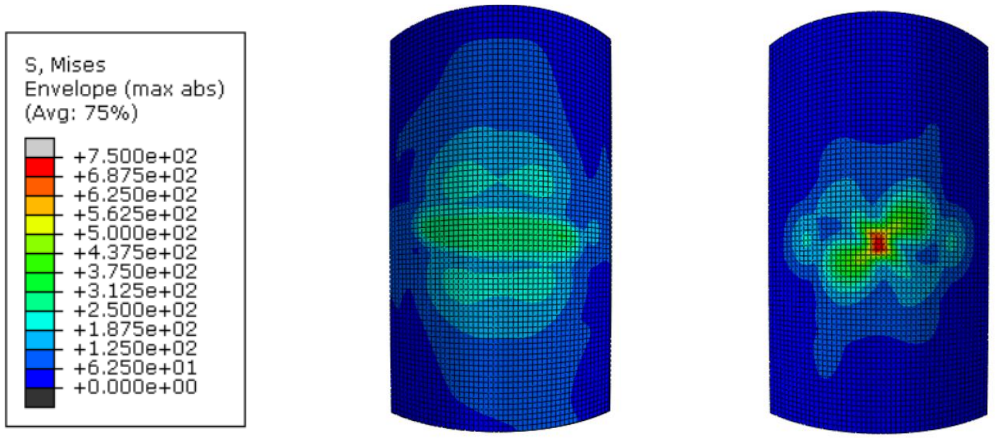


Staklena vlakna $[0/30/60/90]_s$ s cilindrom

t = 0,0063 s

Staklena vlakna $[0/30/60/90]_s$ sa sferom

t = 0,0063 s

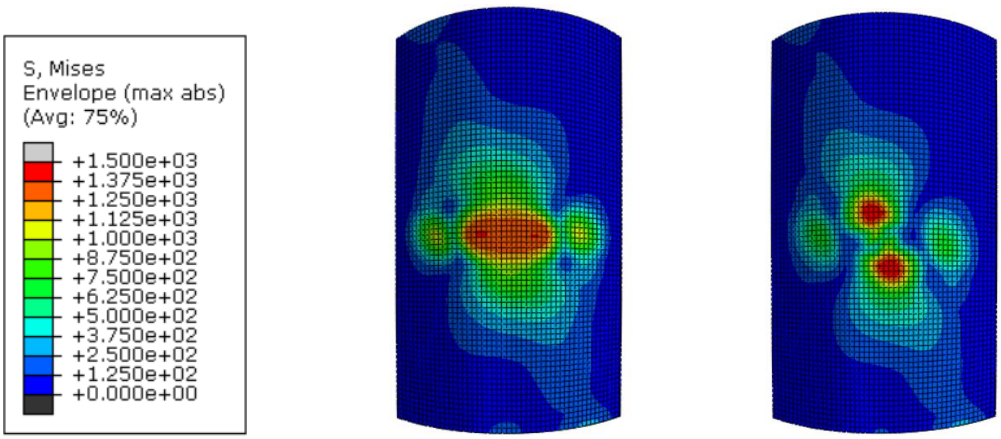


Staklena vlakna $[0/45/90/-45]_2$ s cilindrom

t = 0,0063 s

Staklena vlakna $[0/45/90/-45]_2$ sa sferom

t = 0,0063 s



Ugljična vlakna $[0/30/60/90]_s$ s cilindrom

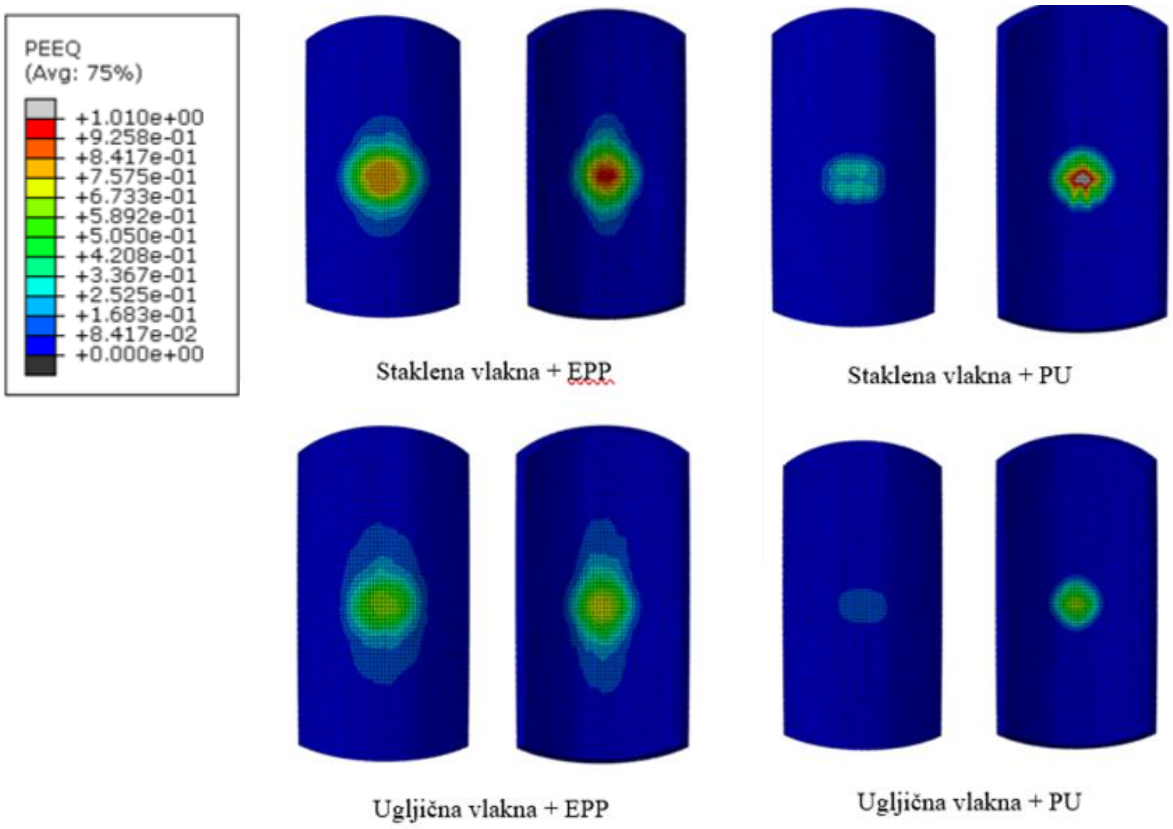
t = 0,0077 s

Ugljična vlakna $[0/30/60/90]_s$ sa sferom

t = 0,0077 s

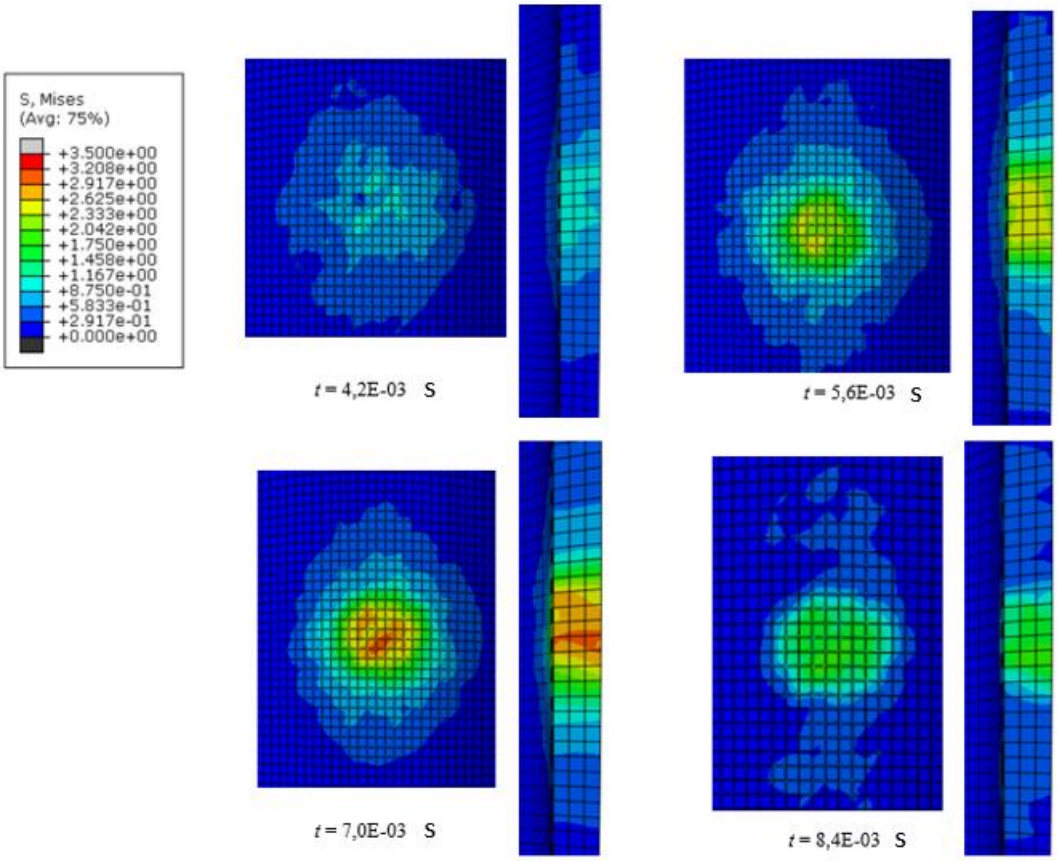
Slika 56. Prikaz ekvivalentnih von Mises naprezanja [MPa] vanjske ljuske za opterećenje cilindrom i sferom

U nastavku su dane vrijednosti ekvivalentnih pomaka i naprezanja za apsorpcijske slojeve štitnika. Na Slici 57. vidljiva je usporedba ekvivalentnih plastičnih deformacija apsorpcijskih slojeva za EPP i PU pjene sa staklenim i ugljičnim vlaknima za slučaj opterećenja s cilindrom s prednje i stražnje strane.

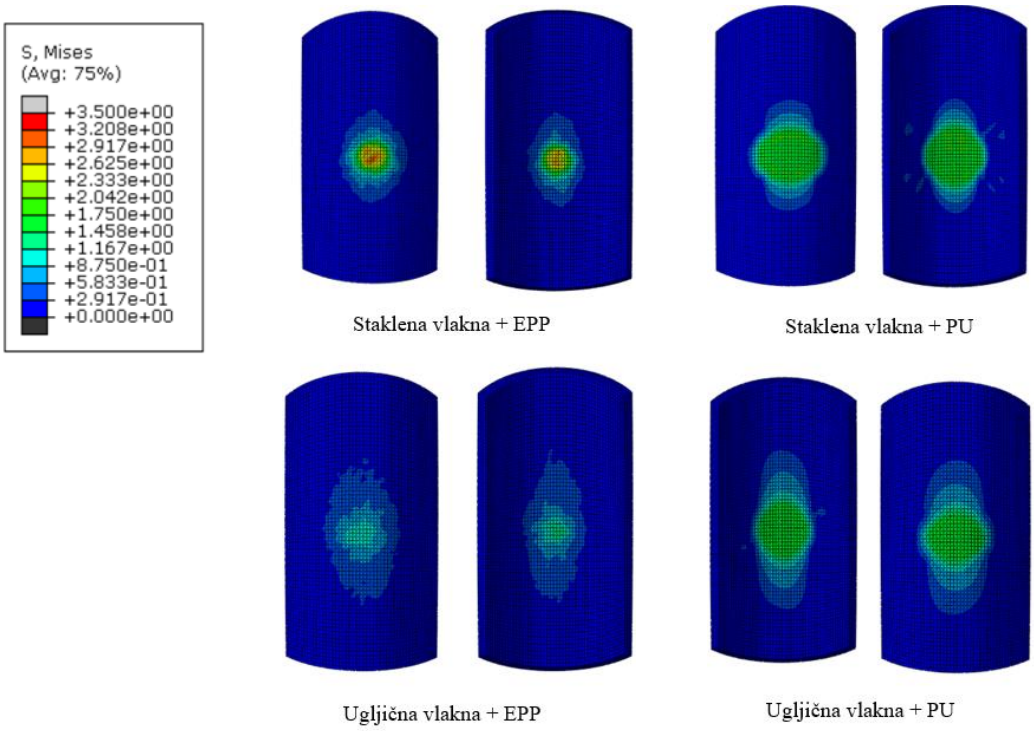


Slika 57. Prikaz ekvivalentnih plastičnih deformacija [-] apsorpcijskog sloja za različite kombinacije materijala kod opterećenja cilindrom

Vidljivo je da su deformacije apsorpcijskog sloja jače izražene kada je vanjska ljuska izrađena od staklenih vlakna. Također, može se uvidjeti kako PU pjena ima više centralizirane, odnosno lokalizirane deformacije na samom mjestu udara, dok se EPP širi od mjesta udara prema van. Važno je za napomenuti kako su štitnici s vanjskom ljuskom od ugljičnih vlakana preuzeli više energije na oštećenje, budući da je maksimalno naprezanje, odnosno trenutak kada se utrošila sva kinetička energija, dogodi unutar 0,0056 s, dok se kod staklenih vlakana to postiže u 0,007 s. Slika 58. prikazuje vremensku ovisnost naprezanja kroz apsorpcijski sloj izrađen od EPP-a sa staklenim vlaknima u određenim vremenskim trenucima sprijeda i u presjeku. Ako isto se pogleda vrijednosti ekvivalentnih naprezanja prema von Misesu za ostale kombinacije u trenutku njihovih maksimuma kao što prikazuje Slika 59., vidi se kako su u modelu s EPP-om naprezanja centralizirana, dok PU ima jednoliko raspoređena naprezanja na većoj površini.

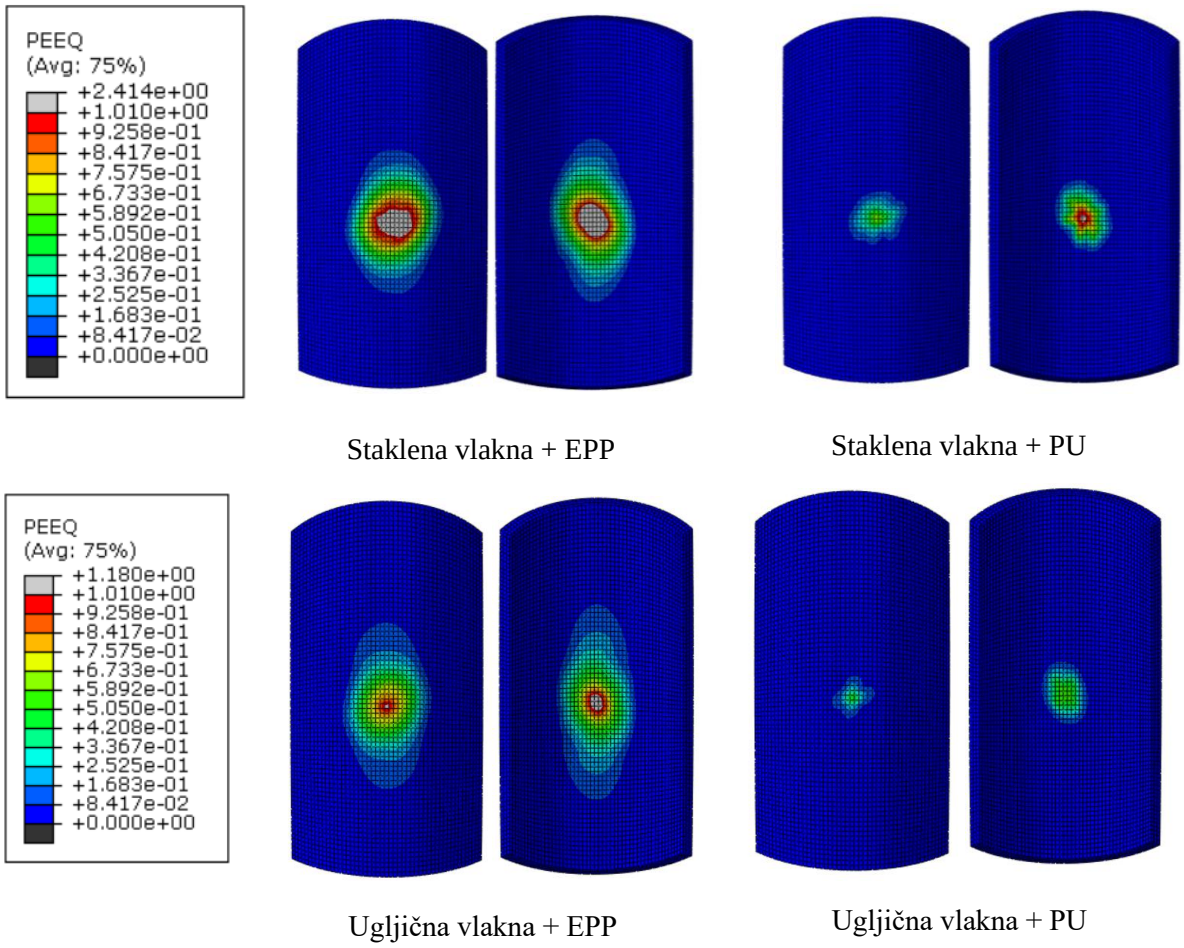


Slika 58. Prikaz ekvivalentnih von Mises naprezanja [MPa] za apsorpcijski sloj kroz vremenski period sprijeda i u poprečnom presjeku

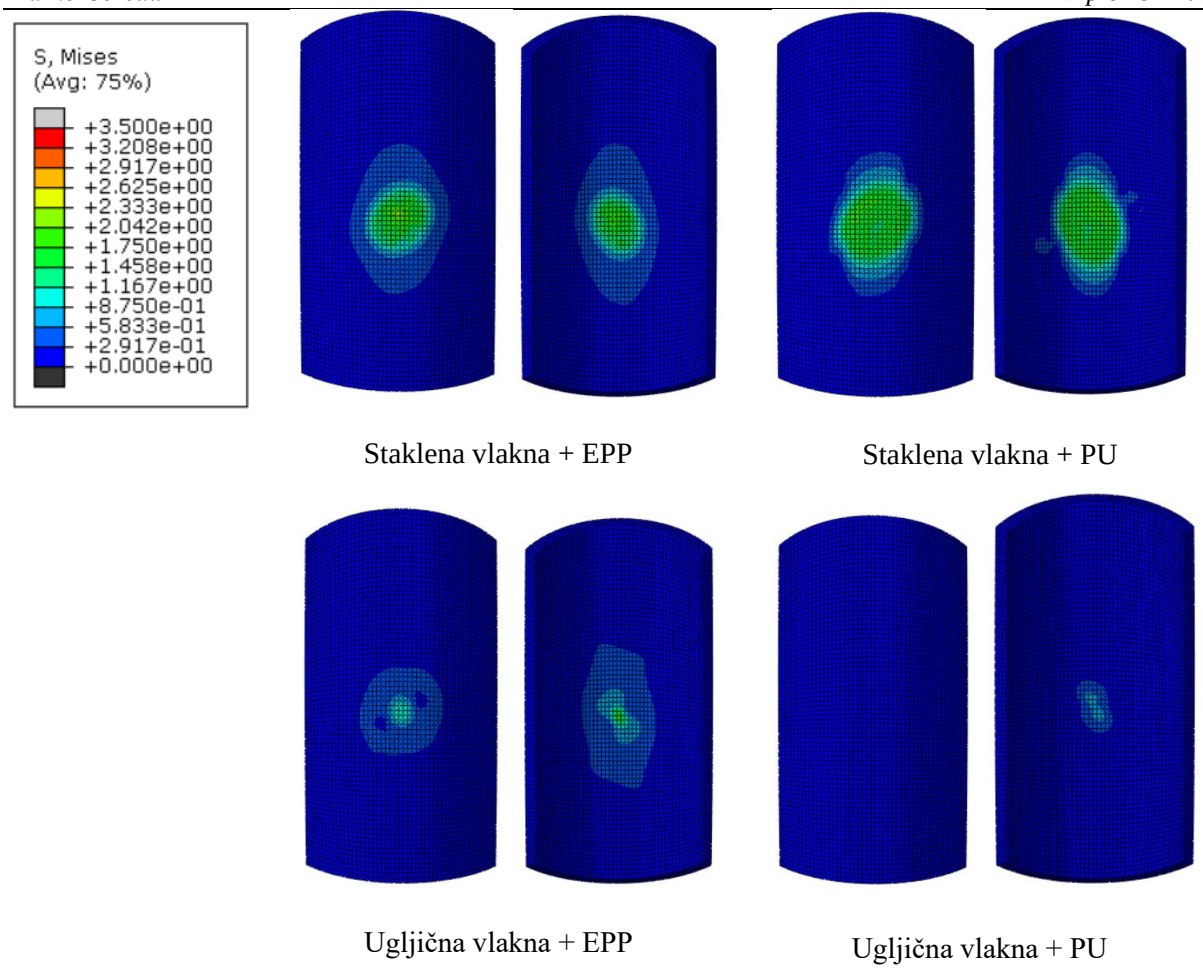


Slika 59. Prikaz ekvivalentnih von Mises naprezanja [MPa] apsorpcijskog sloja za različite kombinacije materijala kod opterećenja cilindrom

Ako se pogledaju deformacije i naprezanja za slučaj udarnog opterećenja induciran sferom koje su prikazane na Slikama 60. i 61., vidljive su znatno veće deformacije (više od duplo veće vrijednosti za primjerice EPP sa staklenim vlaknima). Naravno, prikazane površine ekvivalentnih plastičnih deformacija koje se čire od mjesta udara znatno su manje u usporedbi s udarnim opterećenjem cilindra. Naprezanja po von Mises-u svojim iznosom su približno jednaka kao i kod udara cilindrom, no kako je raspored slojeva u vanjskoj ljusci definirani kao $[0/30/60/90]_s$, vidljivo je kako naprezanja kod udara sfere prikazuju zakretni uzorak što se podudara s rasporedom slojeva.



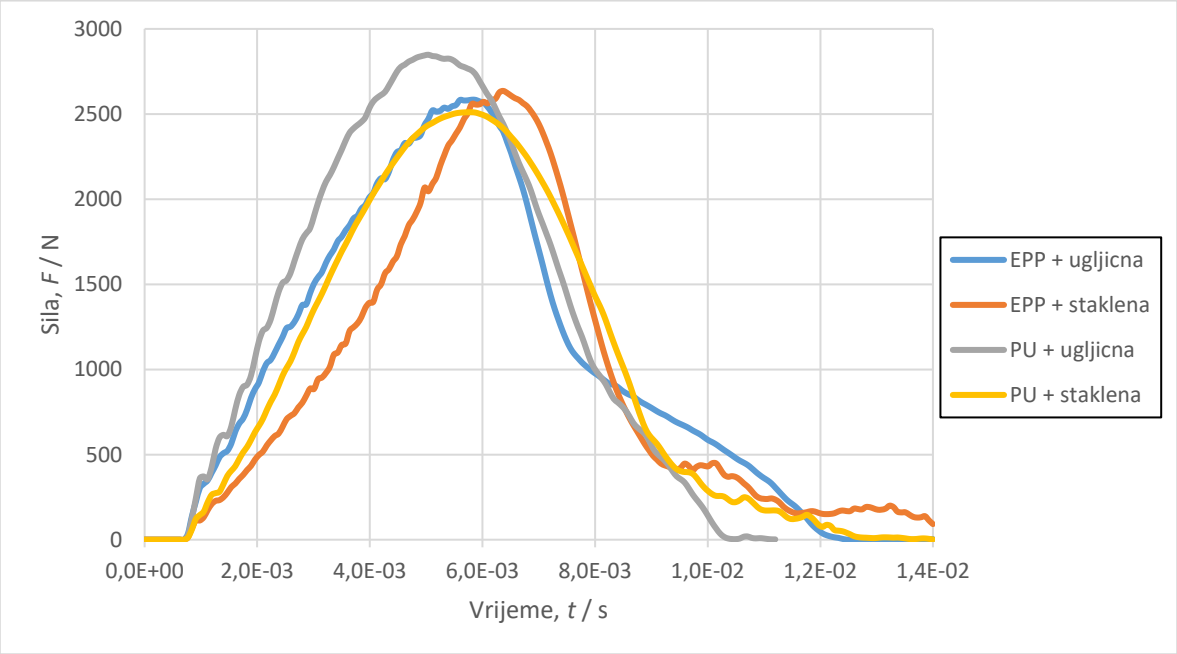
Slika 60. Prikaz ekvivalentnih plastičnih deformacija [-] apsorpcijskog sloja za različite kombinacije materijala kod opterećenja sferom



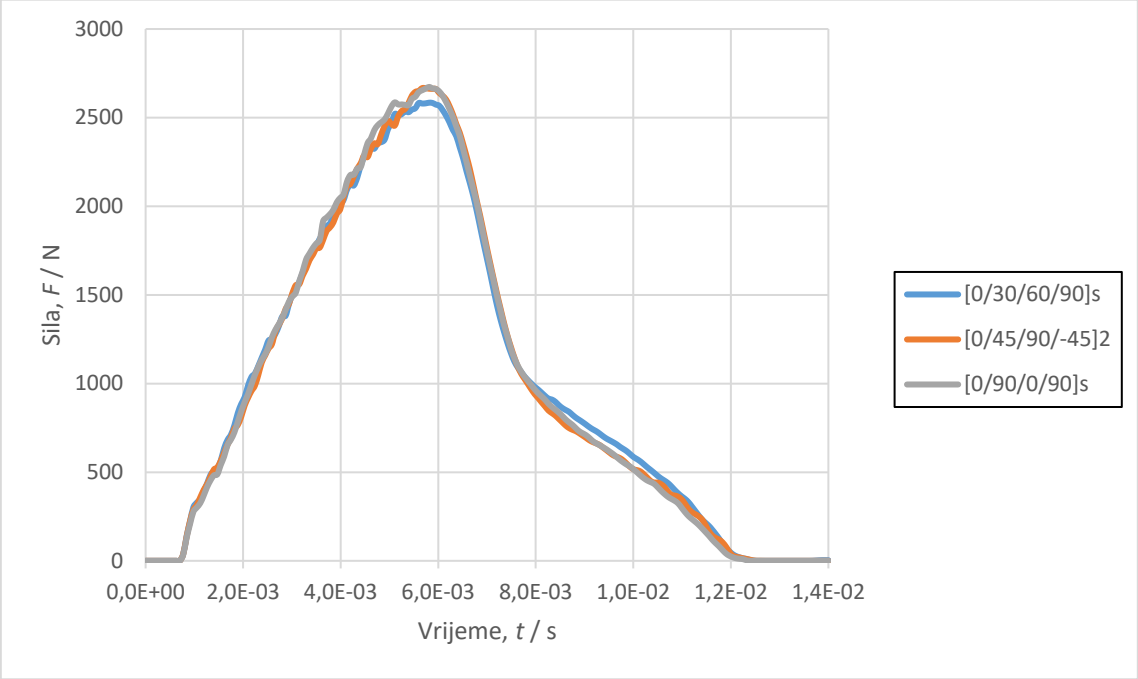
Slika 61. Prikaz ekvivalentnih von Mises naprezanja [MPa] apsorpcijskog sloja za različite kombinacije materijala kod opterećenja sferom

7.3. Analiza kontaktne sile i energija tijekom udara

Osim kriterija popuštanja i naprezanja vanjske ljuske, te naprezanja i ekvivalentnih plastičnih deformacija apsorpcijskog sloja, važno je pratiti parametre kako bi se modelirani štitnik doveo u vezu sa standardom. Najvažniji od tih parametra su kontaktna sila na potkoljenicu i apsorpcija, odnosno utrošak kinetičke energije kao i drugih vrsta energije, poput energije plastične disipacije ili unutrašnje energije. Kontaktna sila dobivena je preko *History output* varijable *Contact force* koji je dostupan nakon što je definirana interakcija između štitnika i cijevi na koju se naslanja. Na Slici 62. vidljivo je kako sve razmatrane kombinacije materijala prilikom udara cilindrom postižu kontaktnu silu od preko 2 500 N što, ako se dovede u usporedbu s standardom koji zahtijeva silu manju od 2 kN, upućuje na to da takvi štitnici neće zadovoljiti taj standard. No međutim, kako u standardu nije definirana visina s koje se otpušta udarač, moguće je da je početno opterećenje korišteno u ovom radu veće nego u standardu. Osim zaključka o standardu, može se uvidjeti kako kontaktna sila kod ugljična vlakna nestaje prije nego kod staklenih vlakna. Promjene postavnog kuta vlakna zanemarive su u pogledu kontaktne sile očitovane na dodiru štitnika s cijevi što je prikazano na Slici 63.

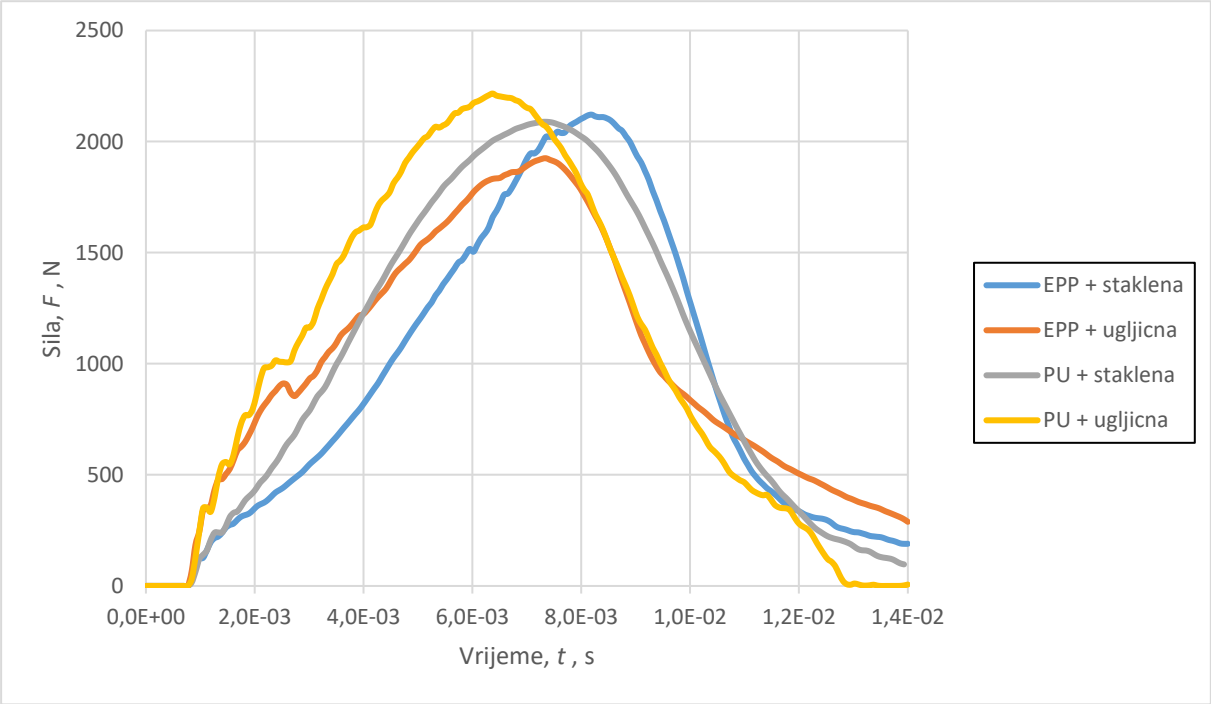


Slika 62. Kontaktna sila prilikom udara cilindrom



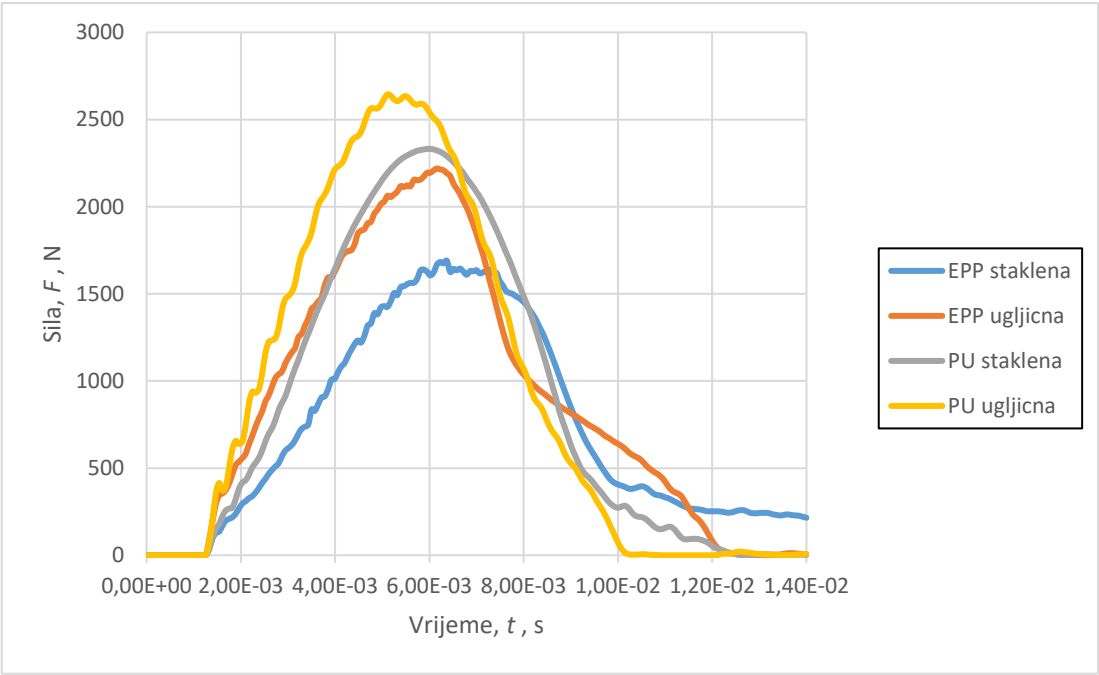
Slika 63. Kontaktna sila kod kompozita s ugljičnim vlaknima za različit raspored slojeva

Promjenom geometrije udarača u sferu, vidi se smanjenje maksimalnog iznosa sile za vrijednost oko 500 N, no potrebno je više vremena za njenu disipaciju, što je prikazano na Slici 64. Kod ugljičnih vlakana s EPP pjenom vidljiva je sila manja od 2 kN što implicira da će takva vrsta štitnika zadovoljiti udar u obliku sfere. S druge strane, ostali štitnici iako iskazuju manju kontaktnu silu, neće zadovoljiti standard.



Slika 64. Kontaktna sila prilikom udara sferom

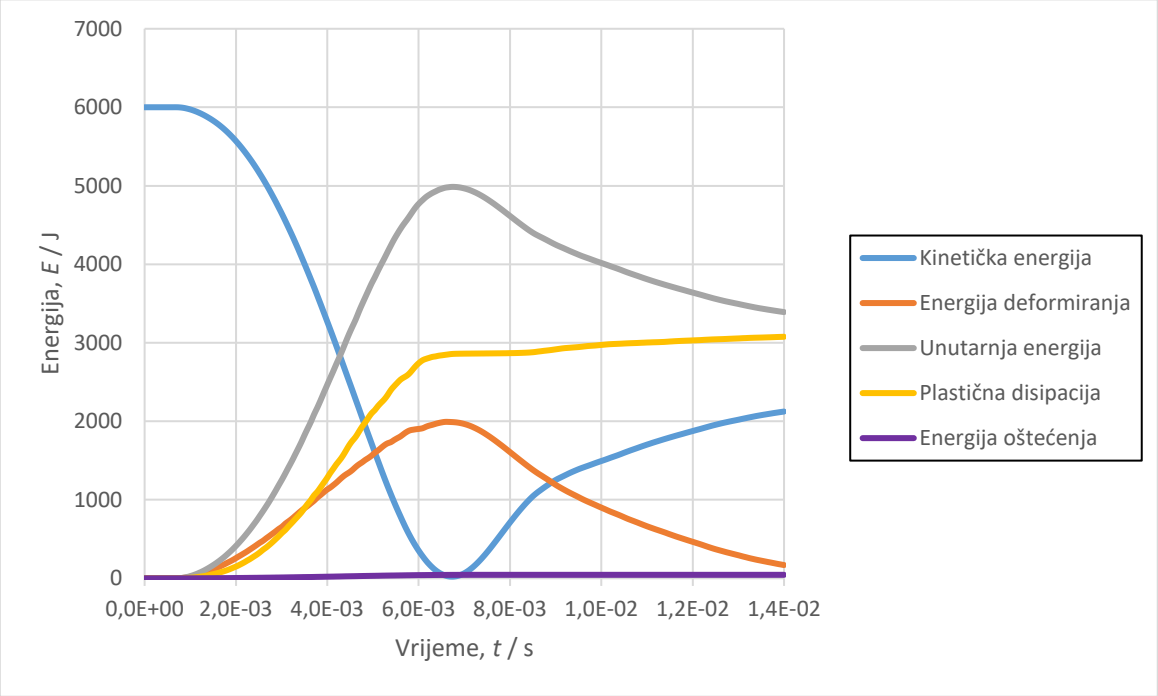
Važno je za napomenuti kako nije došlo do proboja štitnika niti u jednom slučaju što zadovoljava drugi dio standarda, no radi povećane sile, provedena je simulacija s podebljanim apsorpcijskim slojem u svrhu određivanja poveznice debljine sloja i smanjenja kontaktne sile. Apsorpcijski sloj povećan je za 2 mm što na početnu debljinu od 5 mm predstavlja povećanje debljine od 40 %. Slika 65. prikazuje kontaktne sile za udar cilindrom s debljim apsorpcijskim slojem te ako se usporedi sa Slikom 62. vidljivo je smanjenje kontaktne sile kod apsorpcijskog sloja izrađenog od EPP-a, dok razlike kod sloja izrađenog od PU nisu značajne. Nadalje, vidljivo je kako podebljavanje apsorpcijskog sloja znatno više utječe na štitnik izrađen od kompozita ojačanog staklenim vlaknima, odnosno vidljivo je smanjenje maksimalne sile za otprilike 1 kN, odnosno 40 %.



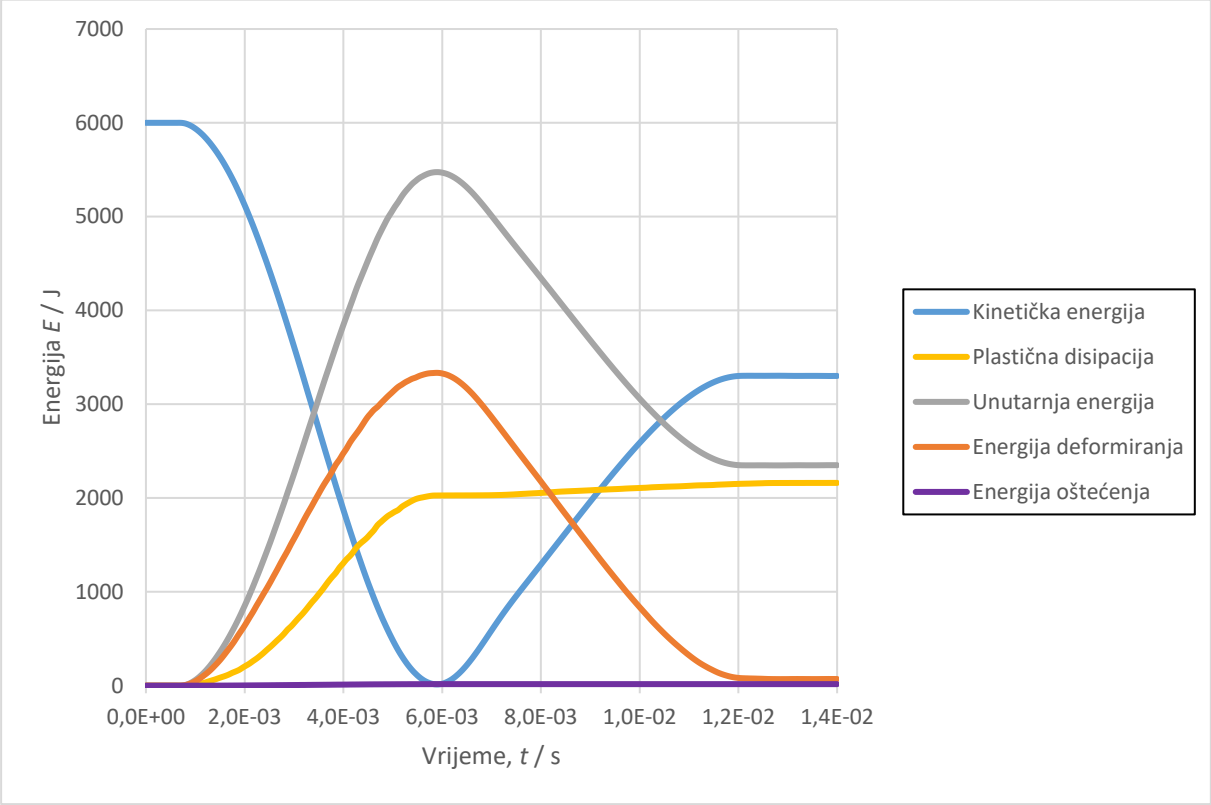
Slika 65. Kontaktna sila kod debljeg apsorpcijskog sloja

Na Slici 66. prikazane su četiri vrste energija. Kinetička energija započinje na 6 J i ona predstavlja gibanje udarača prema štitniku, te se iz oblika krivulje može preračunati trenutna brzina udarača. Kroz vrijeme ona se troši sve do trenutka kada se udarno tijelo ne zaustavi pri udaru sa štitnikom nakon čega se odbija i kreće u suprotnu stranu. Unutarnja energija raste obrnuto-proporcionalno kinetičkoj energiji te se nakon odbijanja troši za odbijanje štitnika do neke asimptotske vrijednosti. Energija deformiranja predstavlja energiju koja se razvija unutar samoga štitnika prilikom deformacija, odnosno utrošenu energiju unutar štitnika i ona raste od nule do trenutka potrošnje kinetičke energije nakon čega pada nazad na nulu. Plastična disipacija predstavlja nepovratnu potrošnju na plastične deformacije apsorpcijskog sloja, dok

energija oštećenja označava energiju utrošenu za oštećenja vlakna. Usporedbom Slike 66. i Slike 67. na kojoj su prikazane energije za ugljična vlakna, vidljivo je kako kod kompozita s ugljičnim vlaknima štitnik preuzmu cijeli iznos kinetičke energije u kraćem vremenskom periodu. Nadalje, kod kompozita s ugljičnim vlaknima generira se puno veća energija naprezanja što rezultira većom kinetičkom energijom prilikom odbijanja u usporedbi s staklenim vlaknima, što je i povezano s plastičnim disipacijama koje su za 50 % manje u usporedbi s staklenima. Energija oštećenja minimalna je iz razloga što ne dolazi do oštećenja vlakna

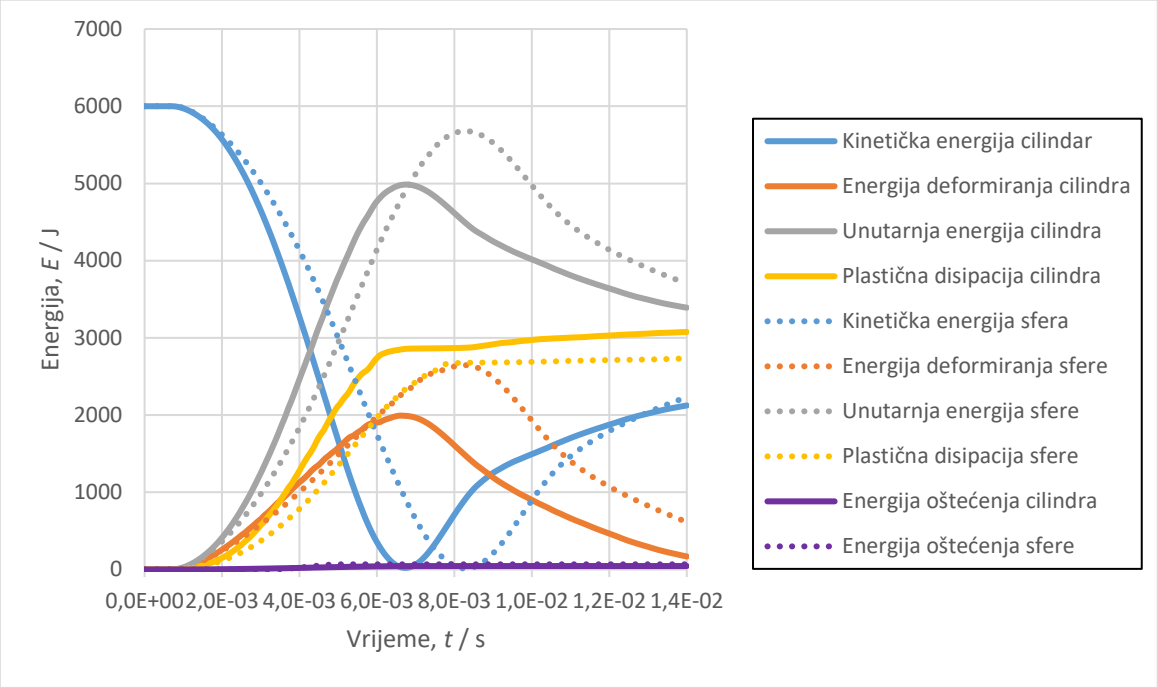


Slika 66. Prikaz energija za štitnik s EPP pjenom i staklenim vlaknima



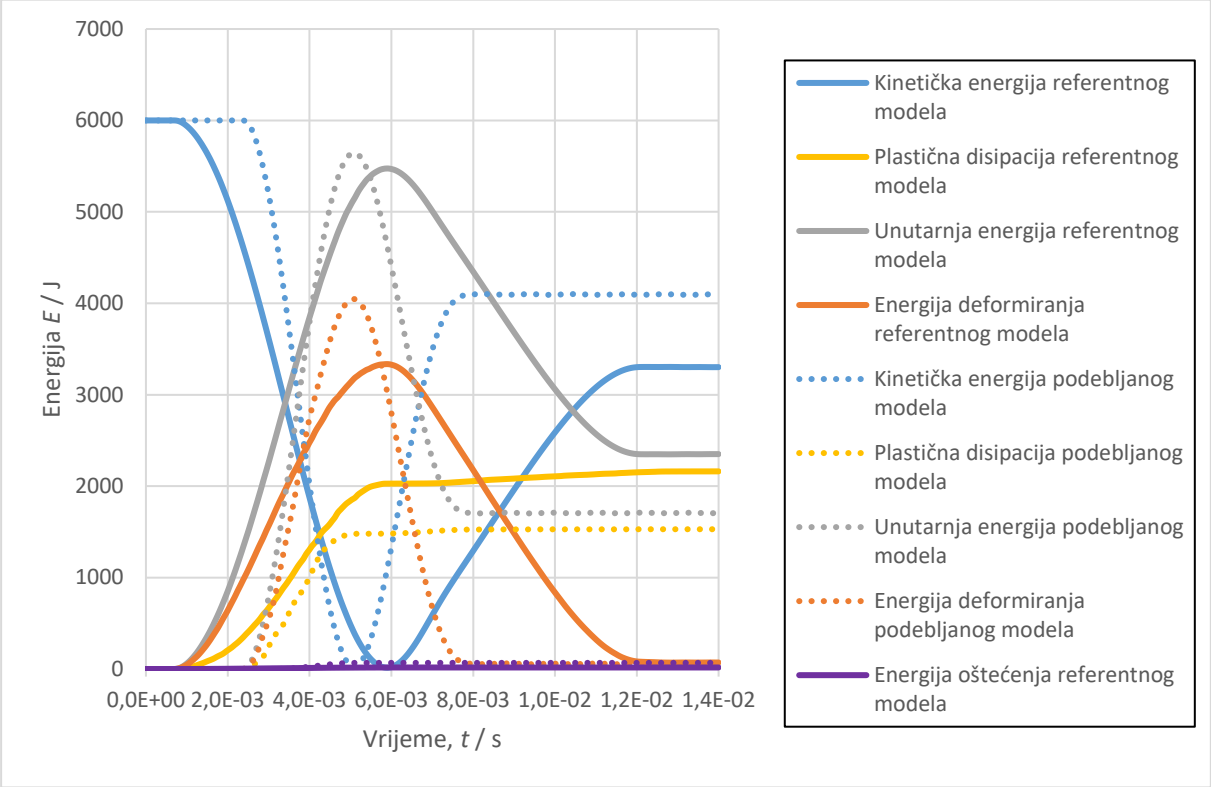
Slika 67. Prikaz energija za štitnik s EPP pjenom i ugljičnim vlaknima

Promjenom rasporeda slojeva nisu vidljive znatne razlike u vrijednostima energija. S druge strane, promjenom načina udarnog opterećenja na sferu koje je na Slici 68. napravljeno za staklena vlakna i EPP, dolazi do pomaka platoa kinetičke energije koja sa sobom vuče platoe za sve ostale energije prema većim vrijednostima, što znači da bi se trebalo produljiti vrijeme simulacije u svrhu postizanja konstantnog iznosa kinetičke, kao i ostalih energija. Samim time dolazi do veće unutarnje energije i više pohranjene energije naprezanja. Plastična disipacija je manja zbog manje kontaktne površine te se može zaključiti kako način opterećenja utječe na sve vrste energija. Energija oštećenja veća je što je u skladu s većim vrijednostima popuštanja i oštećenja slojeva prilikom udara sferom.

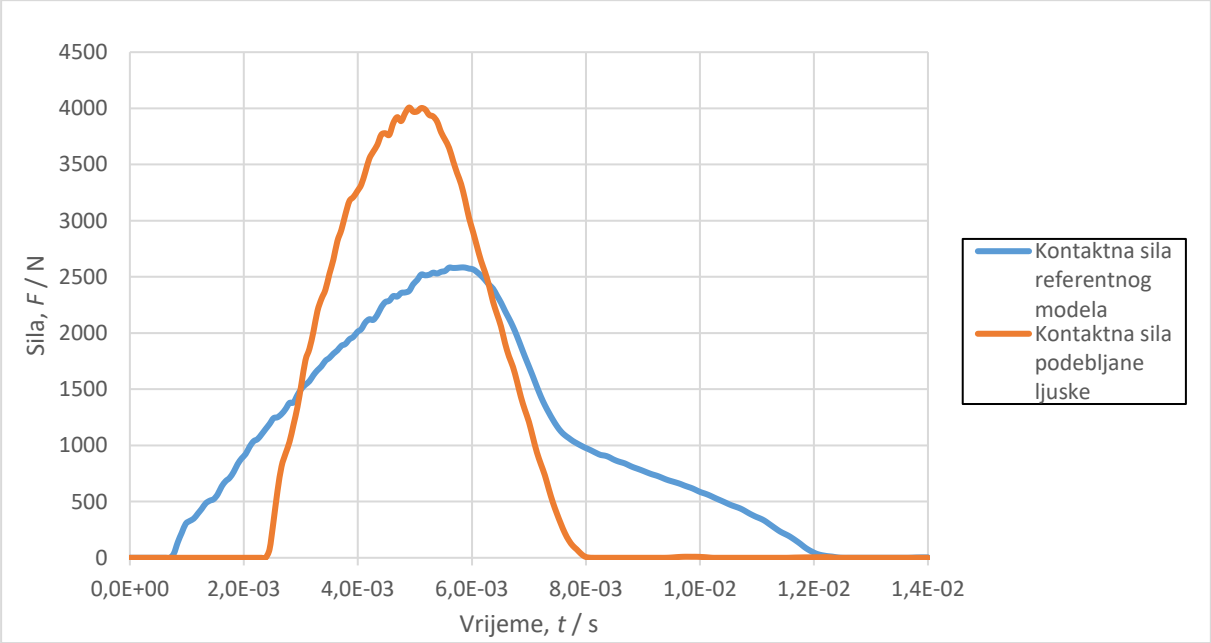


Slika 68. Usporedba energija za udarno opterećenje cilindrom i sferom za staklena vlakna

Osim promjene načina opterećenja još je sagledan i utjecaj povećanja broja slojeva, odnosno debljine vanjske ljuske. U tu svrhu, nova vanjska ljuska za analizu modelirana je dvostruko većom debljinom što znači da će se sastojati od 16 slojeva jednake debljine kao i prethodno navedeno, odnosno 125 µm što rezultira debljinom od 2 mm. Sa Slike 69. može se zaključiti kako je nagib krivulje za kinetičku energiju debljeg sloja vanjske ljuske znatno strmiji nego u slučaju referentnog modela što vodi do zaključka da je s povećanjem sloja vanjske ljuske dolazi do brže potrošnje kinetičke energije udarnog opterećenja. Shodno tome, plastična disipacija manja je pošto manje opterećenja dolazi do apsorpcijskog sloja, a to rezultira i većom kontaktnom silom čija je usporedba vidljiva na Slici 70.



Slika 69. Usporedba energija za različite debljine vanjske ljuske



Slika 70. Kontaktna sila kod podebljane vanjske ljuske

8. ZAKLJUČAK

Za numeričku analizu provedenu u ovom radu korišten je programski paket *Abaqus/Explicit*. Štitnik potkoljenice odabran je kao zaštitna oprema na kojoj je provedena analiza. Simuliran je udar u štitnik preko udarača geometrije cilindra koji predstavlja udar nogom i geometrije sfere koji predstavlja čep na kopačkoj. Materijalna svojstva preuzeta su iz literature za dva različita materijala za vanjsku ljusku te za dvije vrste pjena za apsorpcijski sloj, dok su za vanjsku ljusku odabrana tri različita rasporeda slojeva u svrhu dovoljne varijabilnosti za utvrđivanje konkretnih zaključka. Početni uvjeti mase udarača i brzine udara definirani su prema literaturi i oni su konstantni tijekom cijele analize, a osim mijenjanja materijala i geometrije opterećenja, za neke promatrane rezultate mijenjane su dimenzije.

Prvotno je provedena analiza vanjske ljuske po Hashin-ovom kriteriju popuštanja za najutjecajnije rezultate. Iz tih rezultata može se zaključiti kako će doći do popuštanja matrice unutar prvog sloja ukoliko je udarno opterećenje inducirano cilindrom za ugljična vlakna, dok, s druge strane, uslijed udara sferom vidljiva je propagacija popuštanja po svim slojevima vanjske ljuske. Nakon prikaza popuštanja dan je prikaz oštećenja matrice. Osim popuštanja matrice, dolazi do popuštanja vlakana zadnja dva sloja ljuske koji su u kontaktu s ljudskom nogom kod udara sferom. Prikazana su ekvivalentna naprezanja po von Misesu u vremenu te je dana je usporedba ekvivalentnih naprezanja po von Misesu između kompozita ojačanih staklenim i ugljičnim vlaknima

Nakon analize rezultata vanjske ljuske provedena je analiza ekvivalentnog naprezanja i ekvivalentne deformacije za apsorpcijski sloj te se može zaključiti kako su najmanje deformacije prisutne kod PU pjene s ugljičnim vlaknima dok su najmanja naprezanja vidljiva kod kompozita s ugljičnim vlaknima u kombinaciji s EPP pjenom prilikom udara cilindrom. S druge strane, kod udara sferom ugljična vlakna s PU pjenom prikazuju najmanje ekvivalentne deformacije i naprezanje, dok se primjerice kod staklenih vlakna s EPP-om vidi najveća promjena u deformacijama u usporedbi s udarom cilindra.

Uz promatranje mehaničkog ponašanja, praćena je i kontaktna sila između štitnika i potkoljenice koja prema standardu mora biti manja od 2 kN. Za dani referentni model taj standard zadovoljava samo štitnik izrađen od ugljičnih vlakna s EPP-om prilikom udara sferom. Iz tog razloga, simulacija je provedena s podebljanjem apsorpcijskog sloja te se može zaključiti kako povećanje apsorpcijskog sloja znatno više utječe na štitnike izrađene od staklenih vlakna. Kroz cijelu numeričku analizu, promjena rasporeda slojeva nije pokazivala velike razlike u

rezultatima po vrijednosti, samo po usmjerenosti nastalog oštećenja. Za kraj, promatrane su najutjecajnije energije koje se razvijaju prilikom predaje kinetičke energije s udarača na štitnik i vidljivo je kako ugljična vlakna puno brže apsorbiraju i preuzimaju energiju u usporedbi s staklenima. Nadalje, promjenom geometrije udarača dolazi do promjene u brzini potrošnje energije na način da što je manja kontaktna površina potrebno je više vremena da se preda kinetička energija što ima fizikalnog smisla. S druge strane, dodatni parametar koji se mijenjao za promatranu energiju je debljina vanjske ljuske koja je u svrhu provjere bila dvostruko veća i vidljiva je puno brža apsorpcija kinetičke energije, njeno pohranjivanje znatno je veće, čime je i predana kinetička energija na udarač prilikom odbijanja također puno viša.

LITERATURA

[1] Armor development: https://www.britannica.com/topic/armour-protective-clothing, pristupljeno 06.06.2023.

[2] Protective equipment history: https://en.wikipedia.org/wiki/Football_helmet, pristupljeno 06.06.2023.

[3] Shin guard history: http://fitba2014.blogspot.com/2014/06/a-brief-history-of-shin-guards.html, pristupljeno 06.06.2023.

[4] Shin guard history: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/9/9b/Leg_before_wicket.jpg, pristupljeno 06.06.2023.

[5] Protective gear: https://en.wikipedia.org/wiki/Protective_gear_in_sports, pristupljeno 06.06.2023.

[6] Protective gear: https://www.dreamstime.com/stock-illustration-protective-gear-skateboarding-roller-skating-bike-flat-style-image81802579, pristupljeno 06.06.2023.

[7] Cazón-Martín A, Iturrizaga-Campelo M, Ausejo-Muñoz S. Design and manufacturing of shin pads with multi-material additive manufactured features for football players: A comparison with commercial shin pads. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part P Journal of Sports Engineering and Technology. November 2018. 233(4):175433711881126. doi.10.1177/1754337118811266

[8] https://www.thisissoul.com/products/pro-x3-shin-pads, pristupljeno 06.06.2023.

[9] Composite shin pad: https://m.media-amazon.com/images/I/611SFsPKRKL._SL1000_.jpg, pristupljeno 06.06.2023.

[10] Hockey shin pad: https://www.purehockey.com/product/pure-hockey-phx-elite-shin-guards-youth/itm/41753-11/, pristupljeno 06.06.2023.

[11] Fibre composite shin guard: https://patronus-sports.com/collections/shin-guards, pristupljeno 06.06.2023.

[12] Tatar Y, Ramazanoglu N, Camliguney A, Saygi E, Cotuk H. The Effectiveness of Shin Guards Used by Football Players. J Sports Sci Med. 2014 Jan; 13(1): 120–127.

[13] EVA vs PU foam: https://www.greatmats.com/foam-flooring/eva-vs-pe-vs-pu-know-your-foam-matting-materials.php, pristupljeno 06.06.2023.

[14] Shin guard parts: https://www.hockeymonkey.com/learn/hockey-shin-guard-sizing-chart-guide, pristupljeno 06.06.2023.

[15] Shin guard standards: https://www.satra.com/ppe/EN13061.php, pristupljeno 06.06.2023.

[16] Fibre composite production: https://formlabs.com/blog/composite-materials-carbon-fiber-layup/, pristupljeno 06.06.2023.

[17] Anirudh K, Yeole S. Development of a 3D printed knee protective pad prototype. Materials Today: Proceedings 44(52). February 2021. doi.10.1016/j.matpr.2020.12.488

[18] Shin guard google patents: https://patents.google.com/patent/KR200427143Y1/en?q=(motocycle+shin+guard)&oq=motocycle+shin+guard, pristupljeno 06.06.2023.

[19] Shin guard google patents: https://patents.google.com/patent/US3735419?oq=shin+guard, pristupljeno 06.06.2023.

[20] Žmak I. Predavanja iz kolegija Kompozitni materijali. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2020.

[21] Fibre composites: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/90/Fiber-reinforced_composites_tipology.svg, pristupljeno 06.06.2023.

[22] Smojver I.: Mehanika kompozitnih materijala, Zagreb 2007.

[23] Glass gibre: https://www.indiamart.com/proddetail/fibre-glass-cloth-14619499633.html, pristupljeno 06.06.2023.

[24] Aramid fibre: https://www.adesivisicurezza.it/en/protection/430-fabric-aramid-kevlar-fiber-240-g-m-plain-1-mq-for-bulletproof-vest-8058265272351.html, pristupljeno 06.06.2023.

[25] Carbon fibre shin guard: https://www.lazada.com.ph/products/motowolf-motorcycle-carbon-fiber-knee-pads-elbow-pads-four-seasons-wind-and-warmth-rider-protective-equipment-i2113595401.html, pristupljeno 06.06.2023.

[26] Carbon fibre knee guard: https://www.xccarbonfiber.com/carbon-fiber-knee-guard.html, pristupljeno 06.06.2023.

[27] Borsic: https://borates.today/boron-fibers-aviation, pristupljeno 04.07.2023.

[28] Miao Q, Fu Y, Chun H, Zhang J, Zhao J, Zhang Y. Simultaneous enhancement of mechanical and ablation properties of C/C composites modified by (Hf-Ta-Zr)C solid solution ceramics. Journal of the European Ceramic Society. Vol 43. Issue 8. July 2023. str. 3182-3190. doi. 10.1016/j.jeurceramsoc.2023.02.059

[29] C/C composites: https://en.wikipedia.org/wiki/Reinforced_carbon%E2%80%93carbon, pristupljeno 04.07.2023.

[30] Cicvarić J.J. Analiza biomehanike koljena u sportskim kretnjama [Završni rad]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje. 2018.

[31] Knee joint structure: https://www.knee-pain-explained.com/kneebones.html, pristupljeno 06.06.2023.

[32] Klika V. Biomechanics in Applications. Janeza Trdine. Hrvatska. 2011.

[33] Lei S, Frank M, Anderson D, Brown T. A Method to Represent Heterogeneous Materials for Rapid Prototyping: The Matryoshka Approach. Rapid Prototyping Journal. 2014;20(5):390-402. 58(7). str. 1011.1022. doi. 10.1108/RPJ-10-2012-0095

[34] Lopac V. Opterećenje koljena kod čučanja [Završni rad]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje. 2022.

[35] Petit L, Zaki T, Hsiang W, Leslie M. A review of common motorcycle collision mechanisms of injury. EFORT Open Reviews 5(9):544-548. September 2020. doi. 10.1302/2058-5241.5.190090

[36] Slomljeni meniskus: https://www.svkatarina.hr/ortopedija-i-sportska-medicina/operativni-zahvati-na-meniscima, pristupljeno 06.06.2023.

[37] Abaqus analysis user manual: http://130.149.89.49:2080/v6.11/books/usb/default.htm , pristupljeno 06.06.2023.

[38] PU Foam property: http://www.posterus.sk/?p=4244, pristupljeno 06.06.2023.

[39] Abaqus C3D8 elements: https://web.mit.edu/calculix_v2.7/CalculiX/ccx_2.7/doc/ccx/node26.html , pristupljeno 06.06.2023.

[40] Quinton B W T. PROGRESSIVE DAMAGE TO A SHIP'S STRUCTURE DUE TO ICE LOADING. Thesis for: Master of Engineering. January 2008. doi. 10.13140/RG.2.1.1395.6562

[41] Finn SR, Springer GS. „Composite Plates Impact Damage", An Atlas, Lancaster, Pennsylvania 17604 U.S.A.: Technomic Publishing Company, Inc., 1991.

[42] Soden PD, Hinton MJ, Kaddour AS. Lamina properties, lay-up configuration and loading conditions for a range of fibre-reinforced composite laminates. Coposites Science and technology. Vol 58. Issue 7. srpanj 1998. str. 1011-1022 doi.10.1016/S0266-3538(98)00078-5

[43] Lopes C, Camanho PP, Gurdal Z. Low-velocity impact damage on dispersed stacking sequence laminates. Part II: Numerical simulations.Composites Science and Technology 69(7-8):937-947. June 2009. doi. 10.1016/j.compscitech.2009.02.015

[44] Kathiresan M, Manisekarb K, Manikandan V. Performance analysis of fibre metal laminated thin conical frustum under axial compression. Composite Structures, 2012. Vol 94. Issue 12. str. 3510. – 3519. doi. 10.1016/j.compstruct.2012.05.026

[45] Nelson JW, Riddle TR, Cairns DS. Effects of defects in composite wind turbine blades – Part 2: Progressive damage modeling of fiberglass-reinforced epoxy composites with manufacturing-induced waves. Wind Energy Science. Vol 2. Issue 2. 2017. doi. 10.5194/wes-2-653-2017

[46] Abaqus polyurethane foam crushable foam: https://classes.engineering.wustl.edu/2009/spring/mase5513/abaqus/docs/v6.6/books/bmk/default.htm?startat=ch03s02ach164.html, pristupljeno 21.06.2023.

[47] Rumianek P, Dobosz T, Nowak R, Dziewit P, Arominski A. Static Mechanical Properties of Expanded Polypropylene Crushable Foam. Materials (Basel). 2021 Jan; 14(2): 249. doi. 10.3390/ma14020249

[48] Andena L, Caimmi F, Leonardi L. Towards Safer Helmets: Characterisation, Modelling and Monitoring. Procedia Engineering 147:478-483. July 2016. doi. 10.1016/j.proeng.2016.06.224

[49] Fernandes F, Sousa R, Willinger R, Deck C. Finite Element Analysis of Helmeted Impacts and Head Injury Evaluation with a Commercial Road Helmet. Structural Engineering & Mechanics. 2013. Vol 48. Issue 5, str. 661. – 679.

[50] Jeong K, Cheon S, Munshi M. A constitutive model for polyurethane foam with strain rate sensitivity. Journal of Mechanical Science and Technology. 26 (7). 2012. str. 2033.-2038. doi. 10.1007/s12206-012-0509-1

[51] Wang C, Chen Z, Roy A, Silversmidt V. Ch. 20 - Energy absorption of composite shin-guard structure under low-velocity impacts. In: Dynamic Deformation, Damage and Fracture in Composite Materials and Structures (Second Edition). 2023.