

Numerička simulacija popuštanja višeslojnih kompozitnih ploča pri tlačnom opterećenju nakon udarnog opterećenja

Grubelić, Domagoj

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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:235:647147>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-08-19**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Domagoj Grubelić

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Student:

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

Domagoj Grubelić

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem se Izv. prof. dr. sc. Darku Ivančeviću na pruženoj prilici te ukazanom strpljenju i pruženoj pomoći tijekom izrade ovog rada. Zahvaljujem obitelji i prijateljima na velikoj podršci, razumijevanju i bivanju uz mene u svim trenucima tijekom čitavog perioda studiranja.

Zahvaljujem i djevojci Luciji na iznimnoj i nesebičnoj podršci tijekom pisanja ovog rada.

Domagoj Grubelić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:

Procesno-energetski, konstrukcijski, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodstrojarski

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 22 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 22 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Domagoj Grubelić** JMBAG: 0035203785

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Numerička simulacija popuštanja višeslojnih kompozitnih ploča pri tlačnom opterećenju nakon udarnog opterećenja**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Numerical simulation of the compression after impact failure of laminated composite plates**

Opis zadatka:

Višeslojne kompozitne konstrukcije podložne su nastanku slabo vidljivih udarnih oštećenja (eng. *Barely Visible Impact Damage* – BVID) koja mogu nastati pri neopreznom održavanju kompozitnih konstrukcija. Ova oštećenja su teško uočljiva jer se radi o delaminacijama, odnosno oštećenjima između slojeva kompozitne konstrukcije, koja znatno mogu narušiti otpornost konstrukcije na tlačna opterećenja. Zbog toga se u kompozitnom inženjerstvu velika pozornost posvećuje određivanju preostale tlačne čvrstoće nakon nastanka udarnih oštećenja (eng. *Compression After Impact Strength*).

U diplomskom radu je potrebno:

- napraviti pregled literature o mogućnostima numeričkog modeliranja preostale tlačne čvrstoće kompozita nakon udarnog opterećenja u programu *Abaqus*[®]
- izraditi numerički model višeslojne kompozitne konstrukcije za koji postoje rezultati eksperimentalnog ispitivanja preostale čvrstoće nakon udara u dostupnoj literaturi
- koristiti dvodimenzionalne ili trodimenzionalne konačne elemente te prikladne dostupne materijalne modele i modele oštećivanja
- provjeriti utjecaj rasporeda slojeva na promjenu preostale tlačne čvrstoće nakon udara
- rezultate dobivene primjenom različitih pristupa modeliranju oštećivanja međusobno usporediti i na kraju dati kritički osvrt.

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

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

5. svibnja 2022.

7. srpnja 2022.

18. – 22. srpnja 2022.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Izv.prof.dr.sc. Darko Ivančević

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA	VI
POPIS OZNAKA	VII
SAŽETAK	IX
SUMMARY	X
1. UVOD	1
1.1. Preostala tlačna čvrstoća	1
1.2. Ciljevi rada	2
2. KOMPOZITNI MATERIJALI	3
2.1. Vlakna kao ojačala	3
2.1.1. Ugljična vlakna	4
2.1.2. Staklena vlakna	5
2.1.3. Aramidna vlakna	6
2.2. Matrice	7
3. EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE	9
3.1. Izrada ispitnih uzoraka	9
3.2. Udar pri malim brzinama	10
3.3. Tlačni test nakon udara	12
4. OŠTEĆENJA KOMPOZITA I MODELI OŠTEĆIVANJA	14
4.1. Intralaminarna oštećenja	14
4.2. Interlaminarna oštećenja	17
5. NUMERIČKI MODEL	21

5.1. Abaqus/ Explicit rješavač.....	21
5.1.1. SC8R konačni elementi	22
5.1.2. COH3D8 konačni elementi.....	24
5.2. Definiranje numeričkog modela korištenjem kohezivnih površina za modeliranje kohezivne zone	26
5.2.1. Modul Property	26
5.2.2. Modul Assembly	28
5.2.3. Modul Step.....	28
5.2.4. Modul Interaction.....	29
5.2.5. Modul Load.....	30
5.2.6. Modul Mesh.....	33
5.2.7. Modul Job	34
5.3. Definiranje numeričkog modela korištenjem kohezivnih elemenata za modeliranje kohezivne zone	35
5.3.1. Modul Property	35
5.3.2. Modul Step.....	35
5.3.3. Modul Interaction.....	35
5.3.4. Modul Load.....	36
5.3.5. Modul Mesh.....	36
6. REZULTATI.....	38
6.1. Rezultati udara pri malim brzinama	38
6.2. Tlačno ispitivanje nakon udara	62
7. ZAKLJUČAK.....	66
LITERATURA.....	67

POPIS SLIKA

Slika 1.	Struktura višeslojnog laminata [5].....	4
Slika 2.	Struktura <i>sandwich</i> konstrukcije [5].....	5
Slika 3.	Najprepoznatljiviji proizvodi od ugljičnih kompozita, zrakoplov (lijevo) [7], automobil (desno) [8]	6
Slika 4.	Najprepoznatljiviji proizvodi od staklenim vlaknima ojačanih kompozita, lopatice vjetroturbine (lijevo) [12], broдика (desno) [13]	6
Slika 5.	Najprepoznatljiviji proizvodi od aramidnim vlaknima ojačanih kompozita, zaštitni prsluk (lijevo) [14], zaštitna kaciga (desno) [15]	7
Slika 6.	Usporedba temperatura primjene glavnih tipova materijala matrice [16]	8
Slika 7.	Shematski prikaz VARTM postupka proizvodnje kompozita [18].....	10
Slika 8.	Savijanje i pucanje matrice prilikom udara pri malim brzinama [21]	11
Slika 9.	Rubni uvjeti eksperimentalnog ispitivanja udara pri malim brzinama [22].....	12
Slika 10.	Postolje ispitnog uzorka za tlačni test nakon udara [23].....	13
Slika 11.	Propagacija početnih oštećenja prilikom tlačnog testa [19].....	13
Slika 12.	Načini popuštanja tlačno opterećenog kompozita, a), b) izvijanje vlakana, c) pucanje vlakana, d) lom matrice, e) odvajanje matrice i vlakana [24].....	14
Slika 13.	Delaminacije tlačno opterećenog laminata [24].....	18
Slika 14.	Bilinearan zakon naprezanja – odvajanja [26]	18
Slika 15.	Trodimenzionalni heksaedarski ljuskasti konačni element [26]	23
Slika 16.	Mogući smjerovi normale SC8R konačnog elementa [26]	23
Slika 17.	Primjer diskretizacije zakrivljenog kontinuuma [26]	24
Slika 18.	Numeracija čvorova, ploha i točaka integracije COH3D8 konačnog elementa [26] 25	
Slika 19.	Prostorni prikaz COH3D8 kohezivnog konačnog elementa [26]	25
Slika 20.	Rubni uvjeti u prvom koraku simulacije	31
Slika 21.	Rubni uvjeti u drugom koraku simulacije	32
Slika 22.	Rubni uvjeti trećeg koraka simulacije.....	33

Slika 23.	Diskretizirani model za slučaj korištenja kohezivnih površina	34
Slika 24.	Diskretizirani model za slučaj korištenja kohezivnih elemenata	37
Slika 25.	Aksonometrijski prikaz oštećenja matrice (<i>HSNMTCRT</i>) i delaminacija za laminat L1 – KP	39
Slika 26.	Aksonometrijski prikaz oštećenja matrice (<i>HSNMTCRT</i>) i delaminacija za laminat L2 - KP	40
Slika 27.	Aksonometrijski prikaz oštećenja matrice (<i>HSNMTCRT</i>) i delaminacija za laminat L3 - KP	41
Slika 28.	Aksonometrijski prikaz oštećenja matrice (<i>DAMAGEMT</i>) i delaminacija za laminat L1 - KP.....	42
Slika 29.	Aksonometrijski prikaz oštećenja matrice (<i>DAMAGEMT</i>) i delaminacija za laminat L2 - KP.....	43
Slika 30.	Aksonometrijski prikaz oštećenja matrice (<i>DAMAGEMT</i>) i delaminacija za laminat L3 - KP.....	44
Slika 31.	Aksonometrijski prikaz oštećenja matrice (<i>HSNMTCRT</i>) i delaminacija za laminat L1 - KE	45
Slika 32.	Aksonometrijski prikaz oštećenja matrice (<i>HSNMTCRT</i>) i delaminacija za laminat L2 – KE	46
Slika 33.	Aksonometrijski prikaz oštećenja matrice (<i>HSNMTCRT</i>) i delaminacija za laminat L3 – KE	47
Slika 34.	Aksonometrijski prikaz oštećenja matrice (<i>DAMAGEMT</i>) i delaminacija za laminat L1 - KE.....	48
Slika 35.	Aksonometrijski prikaz oštećenja matrice (<i>DAMAGEMT</i>) i delaminacija za laminat L2 - KE.....	49
Slika 36.	Aksonometrijski prikaz oštećenja matrice (<i>DAMAGEMT</i>) i delaminacija za laminat L3 - KE.....	50
Slika 37.	Aksonometrijski prikaz oštećenja vlakna i delaminacija za laminat L1 – KP	51
Slika 38.	Aksonometrijski prikaz oštećenja vlakna i delaminacija za laminat L2 – KP	52
Slika 39.	Aksonometrijski prikaz oštećenja vlakna i delaminacija za laminat L3 – KP	53
Slika 40.	Aksonometrijski prikaz oštećenja vlakna i delaminacija za laminat L1 – KE.....	54
Slika 41.	Aksonometrijski prikaz oštećenja vlakna i delaminacija za laminat L2 – KE.....	55

Slika 42.	Aksonometrijski prikaz oštećenja vlakna i delaminacija za laminat L3 – KE.....	56
Slika 43.	Usporedba numerički i eksperimentalno dobivene površine ukupnih delaminacija laminata; (a) raspored slojeva L1, (b) raspored slojeva L2, (c) raspored slojeva L3	58
Slika 44.	Promjena reakcijske sile u vremenu tijekom udara – raspored slojeva L1	59
Slika 45.	Promjena reakcijske sile u vremenu tijekom udara – raspored slojeva L2	60
Slika 46.	Promjena reakcijske sile u vremenu tijekom udara – raspored slojeva L3	60
Slika 47.	Promjena reakcijske sile u ovisnosti o pomaku udarača – raspored slojeva L1	61
Slika 48.	Promjena reakcijske sile u ovisnosti o pomaku udarača – raspored slojeva L2	61
Slika 49.	Promjena reakcijske sile u ovisnosti o pomaku udarača – raspored slojeva L3	62
Slika 50.	Presjek ploče; (a) trenutak prije loma, (b) trenutak nakon loma	63
Slika 51.	Promjena tlačne sile u ovisnosti o pomaku – raspored slojeva L1	64
Slika 52.	Promjena tlačne sile u ovisnosti o pomaku – raspored slojeva L2	64
Slika 53.	Promjena tlačne sile u ovisnosti o pomaku – raspored slojeva L3	65

POPIS TABLICA

Tablica 1.	Mehanička svojstva jednosmjerenog sloja [17]	27
Tablica 2.	Odabrane vrijednosti energija loma [28]	28
Tablica 3.	Mehanička svojstva kohezivnog sloja [17].....	30
Tablica 4.	Usporedba ukupnih površina delaminacija dobivenih numerički i eksperimentalno za sva tri rasporeda slojeva	57
Tablica 5.	Rezultati tlačnog ispitivanja nakon udara i greška naspram eksperimenta	62

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A_{Ei}, A_{Li}	[m ²]	Eksperimentalna, odnosno numerička ukupna površina delaminacija za i – ti raspored slojeva
c_d	[m/s]	Brzina širenja dilatacijskog vala kroz materijal
d_f, d_f^t, d_f^c	[-]	Varijable oštećenja vlakna prema Hashin-ovom kriteriju implementiranom u programski paket <i>Abaqus</i>
d_m, d_m^t, d_m^c	[-]	Varijable oštećenja matrice prema Hashin-ovom kriteriju implementiranom u programski paket <i>Abaqus</i>
d_s	[-]	Varijabla smičnog oštećenja prema Hashin-ovom kriteriju implementiranom u programski paket <i>Abaqus</i>
E_i	[Pa]	Modul elastičnosti u i – tom smjeru kompozitnog sloja
E_{LT}^F	[J/m ²]	Uzdužna vlačna energija loma kompozitnog sloja
E_{LC}^F	[J/m ²]	Uzdužna tlačna energija loma kompozitnog sloja
E_{TT}^F	[J/m ²]	Poprečna vlačna energija loma kompozitnog sloja
E_{TC}^F	[J/m ²]	Poprečna tlačna energija loma kompozitnog sloja
G^C	[J/m ²]	Energija potrebna za propagaciju oštećenja
G_{ij}	[Pa]	Modul smicanja u i – j ravnini
$G_{Ic}, G_{IIc}, G_{IIIc}$	[J/m ²]	Kritične vrijednosti energije loma za prvi, drugi i treći način loma materijala
K_{nn}	[Pa]	Koeficijent krutosti kohezivnog sloja u normalnom smjeru
K_{ss}, K_{tt}	[Pa]	Koeficijenti krutosti kohezivnog sloja u tangencijalnim smjerovima
$L_{e,min}$	[m]	Najmanja dimenzija najmanjeg konačnog elementa u diskretnom modelu
M	[-]	Matrica operatora oštećenja za Hashin-ov kriterij implementiran u programski paket <i>Abaqus</i>
n	[-]	Broj međufaznih područja laminata
S_{ij}	[Pa]	Smična čvrstoća u i – j ravnini
t	[s]	Vrijeme
Δt	[s]	Vremenski interval

U_1, U_2, U_3	[m]	Pomaci u smjeru koordinatnih osi x, y, z u programskom paketu <i>Abaqus</i>
UR_1, UR_2, UR_3	[°]	Kutevi zakreta oko koordinatnih osi x, y, z u programskom paketu <i>Abaqus</i>
X_t, X_c	[Pa]	Vlačna, odnosno tlačna čvrstoća u smjeru vlakna
Y_t, Y_c	[Pa]	Vlačna, odnosno tlačna čvrstoća u smjeru okomito na vlakna
δ_n^{\max}	[m]	Maksimalni pomak u normalnom smjeru pri inicijaciji oštećenja
$\delta_s^{\max}, \delta_t^{\max}$	[m]	Maksimalni pomaci u tangencijalnim smjerovima pri inicijaciji oštećenja
η	[-]	Parametar materijala za Benzeggagh – Kenane kriterij
ρ	[kg/m ³]	Gustoća
σ_1, σ_2	[Pa]	Uzdužno, odnosno poprečno naprezanje
τ_{ij}	[Pa]	Smično naprezanje u $i - j$ ravnini

SAŽETAK

Upotreba kompozitnih materijala sve je popularnija pri konstruiranju zbog njihovih iznimnih mehaničkih svojstava i male mase naspram tradicionalnih konstrukcijskih materijala. Njihova anizotropnost omogućava konstruiranje željenih mehaničkih svojstva u željenim smjerovima. Zbog svoje krhkosti izrazito su osjetljivi na udarna oštećenja, odnosno pojavu jedva vidljivih udarnih oštećenja u obliku delaminacija. Udarna oštećenja uzrokuju značajno smanjenje mehaničkih svojstava materijala, a određivanje preostalih vrijednosti vrši se eksperimentalnim ispitivanjima. Od svih mehaničkih svojstava kompozita kao posljedica udara najviše degradira tlačna čvrstoća materijala. Mehanička svojstva određuju se eksperimentalnim ispitivanjima, a s obzirom na to da takva ispitivanja oduzimaju mnogo vremena i zahtijevaju skupu ispitnu opremu, cilj je razviti numeričke modele koji bi smanjili broj potrebnih ispitivanja i ispitnih uzoraka.

U ovom radu predstavljeni su numerički modeli za modeliranje udara pri malim brzinama i tlačnog ispitivanja nakon udara korištenjem materijalnih modela i modela oštećivanja dostupnih u komercijalnom programskom paketu za numeričku analizu metodom konačnih elemenata *Abaqus*[®]. Ispitni laminat modeliran je kao trodimenzionalna ljuska, a inicijacija oštećenja modelirana je pomoću implementiranog 2D kriterija popuštanja prema Hashin-u. Ispitivanja preostale tlačne čvrstoće nakon udara provedena su na tri rasporeda slojeva s različitim brojem međufaznih područja za razvoj delaminacija. Kohezivna zona između slojeva s različitom orijentacijom vlakana modelirana je korištenjem svojstva interakcije između površina (kohezivne površine) i kohezivnih elemenata.

Svi korišteni kriteriji oštećivanja, konačni elementi i postupci modeliranja detaljno su objašnjeni. Nakon analize i usporedbe rezultata izvedeni su konačni zaključci o provedenom radu.

Ključne riječi:

GFRP kompozit, udar pri malim brzinama, delaminacija, kohezivna zona, tlačno ispitivanje nakon udara, preostala tlačna čvrstoća

SUMMARY

Use of composite materials is increasing everyday in designing process due to their exceptional mechanical properties and low mass in comparison with traditional structural materials. Their anisotropic behavior allows design of mechanical properties in a desired direction. Due to their brittleness, composites are extremely sensitive to impact induced damage known as barely visible impact damage in form of delaminations. Impact damage causes drastic reduction in values of mechanical properties and determination of residual values is done experimentally. Of all mechanical properties, compressive strength is the one that degrades the most. Mechanical properties are determined using experimental tests, because these tests take a lot of time and require expensive testing equipment the goal is to develop numerical models which would decrease the number of required experimental tests and testing samples.

This Master thesis will introduce numerical models for modeling the problems of low velocity impact and compression after impact tests using material and damage models available in commercial software for finite element method analysis *Abaqus*[®]. Tested composite panel is modeled as three-dimensional shell and damage initiation is described using implemented 2D Hashin failure criteria. Testing of residual compressive strength after impact is made for three different layups with various numbers of delamination interfaces. Cohesive zone between the plies with different fibre orientations is modeled using interaction properties between the surfaces (cohesive surfaces) and cohesive elements.

All the initiation criteria, finite element types and modeling approaches are explained in detail. After analysis and comparison of obtained results, the final conclusions about the work are given.

Key words:

GFRP composite, low velocity impact, delamination, cohesive zone, compression after impact, residual compressive strength

1. UVOD

Postoji mnogo razloga za sve češće korištenje kompozitnih materijala u različitim granama industrije, pri čemu su glavni razlozi njihova visoka čvrstoća i krutost uz malu masu naspram tradicionalnih konstrukcijskih materijala. Zbog mogućnosti slaganja vlakana u savitljive tkanine ovi materijali omogućavaju iznimnu fleksibilnost u procesu konstruiranja jer pružaju mogućnost orijentiranja vlakana, a time i poboljšanja mehaničkih svojstava u bilo kojem smjeru. Danas je učestala primjena kompozitnih materijala u raznim granama industrije poput zrakoplovstva, pomorstva, automobilske, građevinske, energetske, svemirske i vojne te mnogih drugih industrijskih grana. Kompozitne konstrukcije izrazito su osjetljive na udarna oštećenja. Posljedice udara mogu rezultirati značajnim smanjenjem čvrstoće odnosno integriteta konstrukcije, posebice u situacijama gdje je konstrukcija izložena dinamičkim, promjenjivim opterećenjima [1]. Iako postoje razni načini udara u kompozitne konstrukcije, najčešće se istražuje utjecaj udara pri malim brzinama, kao naprimjer pad alata pri proizvodnji, sklapanju ili održavanju na preostala mehanička svojstva. Prethodno navedeni oblik udara uzrokuje pojavu jedva vidljivih udarnih oštećenja (eng. *Barely Visible Impact Damage* – BVID), koja su vrlo opasna iz razloga, kao što im i sam naziv kaže, što su jedva vidljiva na vanjskoj površini, a često uopće nisu vidljiva. Takva oštećenja uzrokuju lom matrice, pucanje vlakna i delaminacije odnosno odvajanje slojeva [1], a naposljetku dovode do smanjenja u krutosti i čvrstoće, te neočekivanog popuštanja konstrukcije u normalnim, procesom konstruiranja predviđenim uvjetima opterećivanja.

1.1. Preostala tlačna čvrstoća

Prilikom udara pri malim brzinama (eng. *Low Velocity Impact* – LVI) najizraženiji oblik oštećenja kompozitne konstrukcije su delaminacije jer uzrokuju značajno smanjenje tlačne čvrstoće [2]. Kako bi se kvalitetnije moglo predvidjeti ponašanje konstrukcije nakon udarnog oštećenja provode se eksperimentalni testovi za određivanje preostale čvrstoće, najčešće se ispituje preostala tlačna čvrstoća nakon udara (eng. *Compression After Impact Strength* – CAI strength). Ovo mehaničko svojstvo kompozitnih materijala prepoznato je kao svojstvo koje najviše degradira u odnosu na vrijednosti neoštećenog materijala [3].

1.2. Ciljevi rada

Kako je već navedeno, zbog uporabe kompozitnih materijala za izradu vrlo kompliciranih konstrukcija često se zahtijevaju stroge provjere konstrukcije, odnosno skupa i zahtjevna ispitivanja konstrukcije kao i mnoga eksperimentalna testiranja u svrhu pronalaska potrebnih mehaničkih svojstava. Upravo zato sve se više znanstvenih radova objavljuje na ovu temu, kako bi se pronašli što učinkovitiji načini za numeričko predviđanje mehaničkih svojstava materijala, čime bi se smanjio broj potrebnih eksperimentalnih ispitivanja. Cilj ovog rada je izraditi numerički model za simulaciju udara, te predviđanje preostale tlačne čvrstoće nakon udara korištenjem programskog paketa *Abaqus*[®] i u njemu dostupnih materijalnih modela i modela oštećivanja, te dati kritički osvrt na rezultate ukazujući na prednosti i nedostatke korištenih modela u usporedbi s eksperimentalnim podacima iz dostupne literature.

2. KOMPOZITNI MATERIJALI

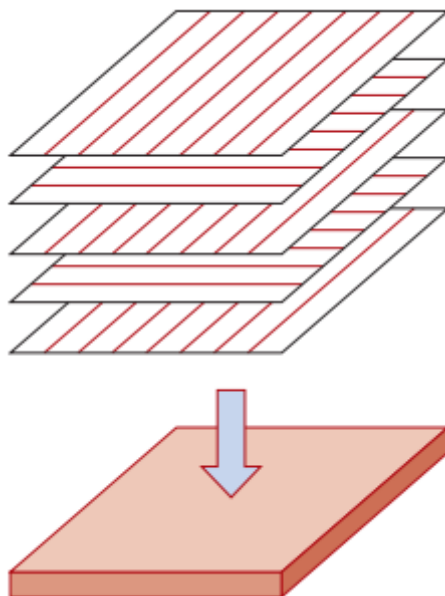
Kompozitni materijali se sastoje od dva osnovna konstituenta: vlakna (ojačala) i matrice koji čine slojeve koji su međusobno povezani i tako čine višeslojni kompozit (laminat) [4]. Osim višeslojnih kompozita postoje i takozvane sendvič konstrukcije (eng. *Sandwich structures*) koje se sastoje od dva glavna dijela, vanjskih slojeva i laganog srednjeg dijela (jezgre). Vanjski slojevi su najčešće od aluminija ili tankih CFRP (eng. *Carbon Fibre Reinforced Polymer*) i GFRP (eng. *Glass Fibre Reinforced Polymer*) laminata. Slika 1. i Slika 2. prikazuju tipičnu strukturu višeslojnog kompozita (laminata) i sendvič konstrukcije. Kada se govori o jednom sloju kompozitnog materijala, uloga vlakna je da podnese glavni dio opterećenja, odnosno osigura čvrstoću i krutost, dok je uloga matrice da obloži vlakna povezujući ih u jedinstvenu strukturu te prenese vanjska opterećenja na vlakna štiteći ih od vanjskih utjecaja. Postoje mnoge vrste vlakana i matrica, a neke od njih bit će spomenute u idućim potpoglavljima. Primjene kompozitnih materijala danas su toliko brojne, da ih je nemoguće sve navesti. Neke od tipičnih industrija gdje se kompoziti učestalo koriste navedene su u uvodnom dijelu. Vrijedno je spomenuti da se danas intenzivno istražuje i nova, zasebna vrsta kompozitnih materijala. Riječ je o nanokompozitima koji pokazuju iznimna mehanička svojstva u odnosu na konvencionalne, ali i kompozitne konstrukcijske materijale. Međutim, njihova upotreba je vrlo ograničena zbog skupe i komplicirane proizvodnje te nerazvijenih smjernica za konstruiranje.

2.1. Vlakna kao ojačala

Vlakna su najčešći oblik ojačala te obično čine 60-70 % volumnog udjela kompozitnog materijala. Ona mogu biti ugljična (eng. *Carbon fibre*), staklena (eng. *Glass fibre*), aramidna (eng. *Aramid fibre*), keramička (eng. *Ceramic fibre*), metalna (eng. *Metallic fibre*) i prirodna (eng. *Natural fibre*). Prirodna vlakna kao ojačala dobivaju sve više na pozornosti budući da se danas u svijetu sve više pažnje pridaje utjecaju materijala na okoliš, ali njihova primjena je ograničena zbog lošijih mehaničkih svojstava u odnosu na ostale vrste vlakana. Nadalje, vlakna mogu biti kontinuirana (eng. *Continuous*) i diskontinuirana (eng. *Discontinuous*). Razlika je u tome što su kontinuirana vlakna usmjerena u jednom smjeru, a diskontinuirana su kratka i usmjerena nasumično u raznim smjerovima. Laminati od kontinuiranih vlakana imaju znatno bolja mehanička svojstva od laminata s diskontinuiranim vlaknima. Po vrsti tkanina razlikuju se mat tkanine (velike debljine s nasumično usmjerenim diskontinuiranim vlaknima),

jednousmjerene tkanine (vlakna se pružaju samo u jednom smjeru) i pletene tkanine (vlakna su isprepletena i pružaju se u različitim smjerovima).

Kako se u industriji najviše upotrebljavaju ugljična, staklena i aramidna vlakna, u nastavku je pružen kratak pregled njihovih karakteristika.



Slika 1. Struktura višeslojnog laminata [5]

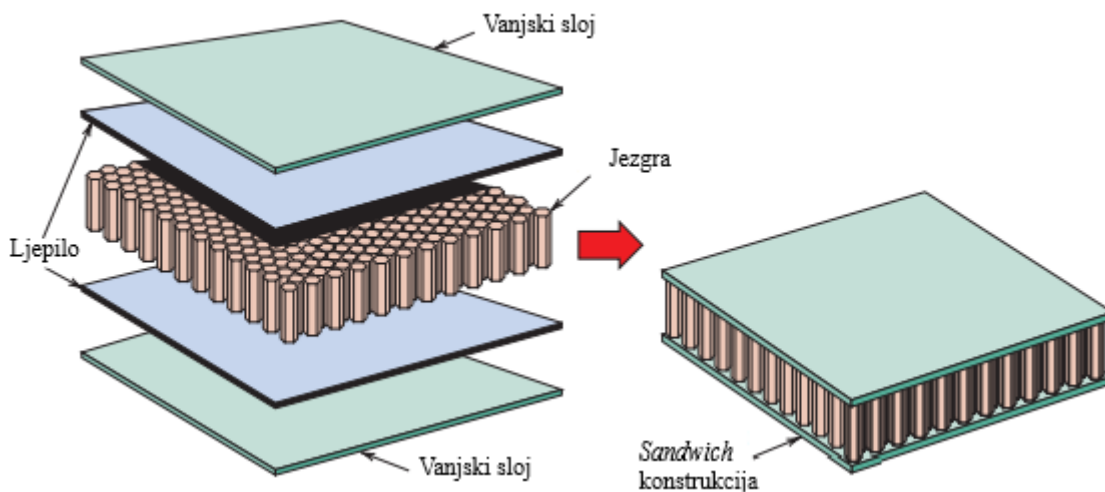
2.1.1. Ugljična vlakna

Ugljična vlakna najčešće se proizvode iz PAN (poliakrilonitril) vlakana te procesima karbonizacije iz različitih smola, a prepoznatljiva su po svojoj crnoj boji. Vlakna proizvedena procesom karbonizacije generalno sadrže veće udjele ugljika, a promjer im se kreće oko 10-11 μm [4]. Ugljična vlakna odlikuje visoka krutost, visok modul elastičnosti, visoka specifična čvrstoća, mala masa, krhkost, visoka otpornost na kemikalije i otpornost na visoke temperature [6]. Prema mehaničkim svojstvima, ugljična vlakna mogu se podijeliti na vlakna [6]:

- ultra visokog modula elastičnosti (eng. *Ultra High Modulus* – UHM) – modul elastičnosti $> 450 \text{ GPa}$
- visokog modula elastičnosti (eng. *High Modulus* – HM) – modul elastičnosti između $350 - 450 \text{ GPa}$
- umjerenog modula elastičnosti (eng. *Intermediate Modulus* – IM) – modul elastičnosti između $200 - 350 \text{ GPa}$
- visoke vlačne čvrstoće (eng. *High Tensile* – HT) – modul elastičnosti $< 100 \text{ GPa}$, vlačna čvrstoća $> 3 \text{ GPa}$

- super visoke vlačne čvrstoće (eng. *Super High Tensile* – SHT) – vlačna čvrstoća > 4,5 GPa.

Slika 3. prikazuje najprepoznatljivije proizvode koji sadrže ugljikom ojačane kompozite.



Slika 2. Struktura *sandwich* konstrukcije [5]

2.1.2. Staklena vlakna

Staklena vlakna jedna su najkorištenijih ojačala u izradi kompozitnih materijala zbog svojih dobrih mehaničkih svojstava i relativno niske cijene. Proizvode se od silike (silicijevog dioksida) s raznim dodacima ovisno o tipu staklenih vlakana i prepoznatljiva su po svojoj bijeloj boji. Ovisno o procesu proizvodnje i kemijskom sastavu, moguće je dobiti vlakna promjera 3 – 20 μm [9]. Općenito govoreći karakterizira ih visoka krutost, dobra čvrstoća, niska cijena proizvodnje i odlična otpornost na djelovanje kemikalija. Naravno, postoje i mnoge druge prednosti ovisno o tipu staklenih vlakana. Staklena vlakna prema mehaničkim svojstvima mogu se podijeliti na [10]:

- A – staklena vlakna: niske čvrstoće i malog modula elastičnosti, otporna na djelovanje kemikalija
- C – staklena vlakna: niske čvrstoće i malog modula elastičnosti, izvrsne otpornosti na djelovanje kemikalija
- D – staklena vlakna: najniže čvrstoće od svih staklenih vlakana, mala dielektrična konstanta
- E – staklena vlakna: najkorištenija vlakna dobre čvrstoće i modula elastičnosti, odlična svojstva izolatora električne energije
- S – staklena vlakna: visoke vlačne čvrstoće i vlačnog modula elastičnosti

- ECR – staklena vlakna: dugotrajne otpornosti na djelovanje kiselina i kratkotrajne otpornosti na djelovanje lužnatih otopina
- R – staklena vlakna: visoke vlačne čvrstoće i visokog vlačnog modula elastičnosti, postojanost mehaničkih svojstava pri visokim temperaturama.

Slika 4. prikazuje najprepoznatljivije proizvode koji sadrže staklenim vlaknima ojačane kompozite.



Slika 3. Najprepoznatljiviji proizvodi od ugljičnih kompozita, zrakoplov (lijevo) [7], automobil (desno) [8]

2.1.3. Aramidna vlakna

Posljednjih par desetljeća sve je češća upotreba aramidnih vlakana kao ojačala, često se spominju pod nazivima Kevlar[®], Nomex[®] i Twaron[®] ovisno o proizvođaču. Aramidna vlakna čine sintetske linearne makromolekule koje su sastavljene od aromatskih skupina povezanih amidnim ili imidnim vezama [11]. Ova vrsta vlakana posjeduje nižu čvrstoću i modul elastičnosti od ugljičnih vlakana, ali za razliku od njih nisu krhka već žilava i prepoznatljiva su po svojoj žućkastoj boji. Odlikuje ih otpornost na trošenje, dobra kemijska i toplinska postojanost, ali i degradacija materijala pri izloženosti UV zračenju. Zbog svojih dobrih mehaničkih i kemijskih svojstava ova vlakna imaju veliki tržišni potencijal, ali im je primjena ograničena zbog složenog procesa proizvodnje koji rezultira njihovom visokom cijenom.



Slika 4. Najprepoznatljiviji proizvodi od staklenim vlaknima ojačanih kompozita, lopatice vjetroturbine (lijevo) [12], brodica (desno) [13]

Slika 5. prikazuje najprepoznatljivije proizvode napravljene od aramidnim vlaknima ojačanog kompozita.



Slika 5. Najprepoznatljiviji proizvodi od aramidnim vlaknima ojačanih kompozita, zaštitni prsluk (lijevo) [14], zaštitna kaciga (desno) [15]

2.2. Matrice

Glavne funkcije matrice su prenošenje opterećenja na vlakna, zaštita vlakana od vanjskih utjecaja, osiguravanje vanjske forme kompozita i međusobno odvajanje vlakana kako bi se spriječilo/ublažilo širenje pukotina u materijalu. Osim vlaknima, mehanička svojstva kompozita uvelike su definirana i svojstvima matrice, čija mehanička i kemijska svojstva definiranju ograničenja upotrebe materijala. Od mehaničkih svojstava kompozita koja najviše ovise o materijalu matrice ističu se uzdužna tlačna čvrstoća, poprečna vlačna čvrstoća i međuslojna posmična čvrstoća i obično se kaže da su ova svojstva uvjetovana matricom [4]. Postoje tri glavna tipa matrica ovisno o materijalu:

- metalne matrice
- kremičke matrice
- polimerne matrice.

Metalne matrice ne koriste se često zbog svojeg kompliciranog i skupog postupka proizvodnje. Najčešće se izrađuju od lakih legura aluminija, magnezija i titana. Metalne matrice osiguravaju visoku čvrstoću, visoku krutost, otpornost na trošenje, žilavost te električnu vodljivost, a glavna prednost su im visoke temperature primjene u rasponu od 200 do 800°C [16]. Osim visoke cijene nedostatak su im loša recikličnost i nedostatak smjernica za konstruiranje.

Keramičke matrice se također ne koriste često zbog komplicirane proizvodnje i visoke cijene. Najčešći materijali od kojih se proizvode su aluminijev oksid i silicijev dioksid. Općenito

govoreći keramičke matrice karakterizira vrlo visoka temperatura primjene, otpornost na oksidaciju, otpornost na koroziju, otpornost na trošenje, visoka tvrdoća i izražena krhkost.

Polimerne matrice najzastupljenije su u primjeni zbog dobro razvijenih proizvodnih procesa i relativno niske cijene, a karakterizira ih mala masa i niska temperatura primjene u usporedbi s metalnim i keramičkim matricama. Možemo ih podijeliti na dvije skupine, duromerne i plastomerne polimerne matrice. Glavna razlika između ovih dviju skupina je što duromeri stvaraju ireverzibilne kemijske veze među polimernim lancima, što znači da pri ponovnom zagrijavanju ne mijenjaju stanje, već ostaju čvrsti. Za razliku od duromera, plastomeri ponovnim zagrijavanjem omekšavaju, što omogućava njihovo preoblikovanje, a samim time i mogućnost popravljivanja kompozita s plastomernom matricom, što je inače veliki problem kod kompozitnih konstrukcija. S obzirom na porast ekološke osviještenosti u svijetu i sve strožih ekoloških standarda lako je zaključiti kako je najveća mana duromernih matrica njihova loša recikličnost. Slika 6. daje grubu usporedbu temperatura primjene za tri glavna tipa materijala matrice. Unatoč navedenoj mani, duromerne matrice češće se koriste od polimernih zbog niske cijene i boljih mehaničkih svojstava te viših temperatura primjene. Od njih najviše se koriste epoksidne smole (eng. *Epoxy resin*) zbog vrlo dobrih mehaničkih svojstava, niske cijene, jednostavnog korištenja pri raznim proizvodnim postupcima, te odličnog prijanjanja s najčešće korištenim vrstama vlakana. Nadalje, epoksidne smole zadržavaju dobra mehanička svojstva pri povišenim temperaturama i u vlažnim okolinama, uz to su i dobre kemijske postojanosti. Uobičajeno je njihovo korištenje u kombinaciji s ugljičnim i staklenim vlaknima čime se dobiva materijal visokih mehaničkih svojstava. Epoksidne smole su dvokomponentne što znači da bi došlo do skrućivanja potrebno je dodati očvršćivač. Ovisno o tipu smole i udjelu očvršćivača moguće je regulirati vrijeme skrućivanja. Još jedna prednost epoksidnih smola je što mogu skrućivati na zraku pri sobnoj temperaturi. S druge strane, kad skrućuju u peći nisu potrebne visoke proizvodne temperature što olakšava proces proizvodnje. Velika mana epoksidnih smola je njihova krhkost nakon skrućivanja, što je moguće ublažiti dodatkom raznih aditiva. Upravo su zato kompoziti s epoksidnom matricom i ugljičnim ili staklenim vlaknima vrlo osjetljivi na udarna opterećenja jer oba konstituenta iskazuju krhko ponašanje.



Slika 6. Usporedba temperatura primjene glavnih tipova materijala matrice [16]

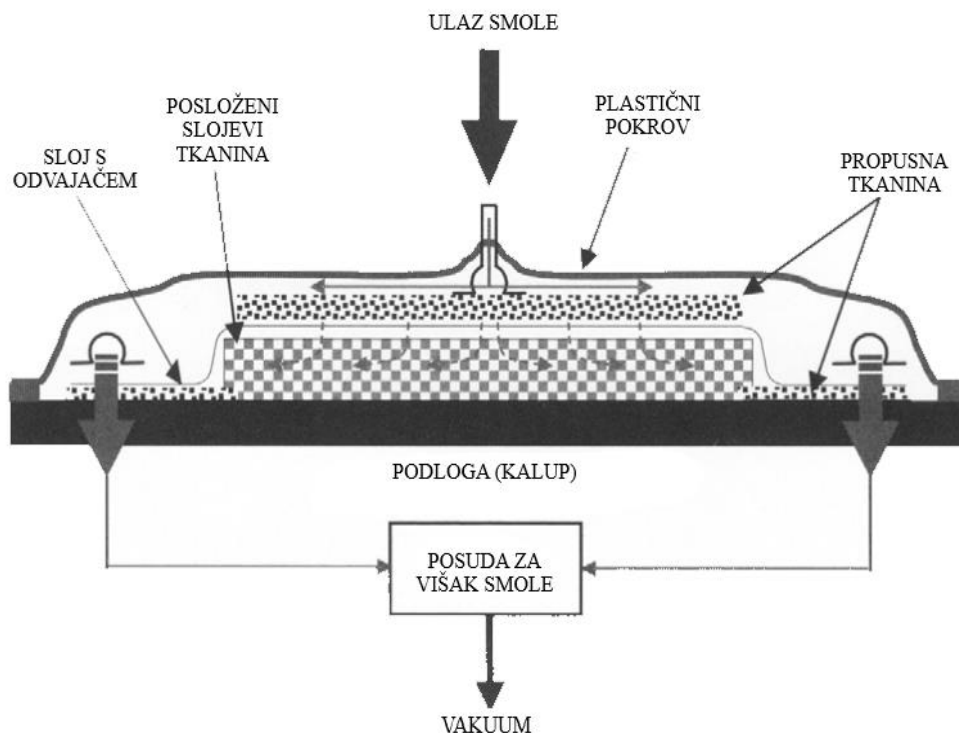
3. EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE

Iz dostupne literature odabran je članak koji sadržava eksperimentalne rezultate preostale tlačne čvrstoće nakon udara pri malim brzinama vlaknima ojačanog polimernog kompozita. Eksperimentalno ispitivanje sastoji se od četiri glavne faze, prva od njih je izrada uzoraka prema uputama iz norme, nakon toga se provodi kontrolirani udar, zatim slijedi ispitivanje preostale čvrstoće, te konačno obrada prikupljenih podataka. Sve faze provedene su u skladu sa standardnom testnom metodom ASTM D713 [17].

3.1. Izrada ispitnih uzoraka

Prema literaturi [17], ispitni uzorci izrađeni su od R – staklenih vlakana i epoksidne smole postupkom vakuumske infuzije (eng. *Vacuum infusion*). Ova vrsta materijala najčešće se koristi u izradi kompozitnih brodova, za izradu lopatica vjetroturbina i mnogih drugih proizvoda. Korištene su tkanine s jednousmjerenim kontinuiranim vlaknima izrađene od 3B's HiPer-tex W2020 R – staklenih vlakana mase 1150 g/m², a za matricu je korištena epoksidna smola EPIKOTE MGS 135 s dodatkom EPIKURE MGS 137 očvršćivača, te je konačni udio vlakana 54 %. Laminat je prvo skrućivao na sobnoj temperaturi 24 sata, a zatim 15 sati u peći na temperaturi od 80°C.

Iako postoje razni načini izrade kompozita, autori su u ovom eksperimentu odabrali postupak vakuumske infuzije za koji se u literaturi često koristi i kratica VARTM (eng. *Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding*). Prednost tog postupka u odnosu na primjer, postupak ručnog polaganja je u tome što se na ovaj način postiže veći udio vlakana u kompozitu, odnosno koristi se manje smole jer je kvalitetnije i ujednačenije upijanje smole u vlakna zbog podtlaka uzrokovanog vakuumom. Proces se sastoji od polaganja suhe, neimpregnirane tkanine u kalup, potom se kalup prekriva s plastičnim pokrovom na kojem se nalaze predviđena mjesta za ulaz smole, te prihvat na koji se spoji pumpa koja stvara vakuum ispod pokrova. Kalup i pokrov premažu se sa sredstvom za odvajanje, kako bi se nakon skrućivanja kompozit mogao jednostavno izvaditi bez oštećivanja materijala. Nedostatak procesa je što se povećanjem stupnja kompleksnosti geometrije znatno komplicira i postupak proizvodnje, što može eliminirati i glavne prednosti ovog postupka. Slika 7. pruža shematski prikaz prethodno objašnjenog VARTM procesa proizvodnje. Prema autorima, izrađena su tri laminata s različitim kombinacijama jednousmjerenih slojeva konačnih dimenzija 150 x 100 mm i ukupne debljine laminata od 6,8 mm.



Slika 7. Shematski prikaz VARTM postupka proizvodnje kompozita [18]

Svaki laminat sadrži osam slojeva usmjerenih pod kutovima 0° i 90° , ali slaganih različitim redoslijedom. Zbog toga svaki od laminata ima ista mehanička svojstva u smjeru glavnih koordinatnih osi x i y koje leže u ravnini laminata (os x poklapa se s usmjerenjem od 0° i položena je uzduž duže osi). Laminati se radi toga razlikuju samo po broju međufaznih područja između slojeva (eng. *Interface*) na kojima nema vlakana već postoji samo adhezivni sloj. Upravo na ovim međuslojnim područjima dolazi do pojave delaminacija – odvajanja slojeva, a pretpostavlja se kako do delaminacija dolazi samo između slojeva koji su različitih postavnih kutova. Korišteni rasporedi slojeva (eng. *Layup*) su idući:

- L1 (*Layup* 1) je $[0,0,90,90]_s - n = 2$
- L2 (*Layup* 2) je $[0,90,90,0]_s - n = 4$
- L3 (*Layup* 3) je $[0,90,0,90]_s - n = 6$

gdje n označava broj međufaznih područja za razvoj delaminacija.

3.2. Udar pri malim brzinama

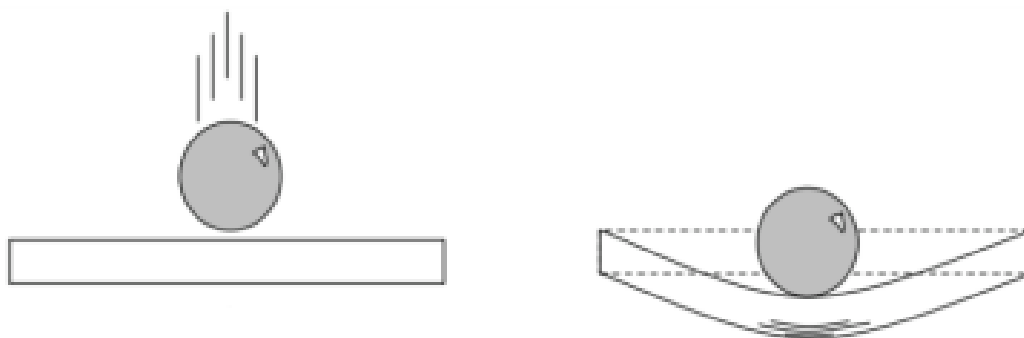
Kako je već spomenuto, udarna opterećenja uzrokuju oštećenja kompozitnih konstrukcija u obliku pucanja vlakana, loma matrice i delaminacija odnosno odvajanja slojeva. Dok se pucanje vlakana i matrice često može uočiti na vanjskoj površini materijala, delaminacije se nalaze unutar materijala te su zbog toga nevidljive i nemoguće ih je otkriti bez korištenja posebnih alata za inspekciju stanja materijala koje spadaju u kategoriju nedestruktivnih metoda

inspekcije (eng. *Non-Destructive Inspection – NDI*). Nakon oštećenja uzrokovanih udarom kompozitnim materijalima znatno se smanjuju mehanička svojstva. Upravo zato provode se udarna eksperimentalna ispitivanja, te potom ostala ispitivanja u svrhu provjere preostalih vrijednosti mehaničkih svojstava.

Udarne opterećenja kompozita mogu se podijeliti u nekoliko kategorija ovisno o brzini udarnog objekta, prema [19] te kategorije su:

- udar pri malim brzinama – brzine manje od 10 m/s
- udar pri srednjim brzinama – brzine od 10 m/s do 50 m/s
- udar pri velikim brzinama – brzine od 50 m/s do 1000 m/s
- udar pri hiper brzinama – brzine veće od 1000 m/s.

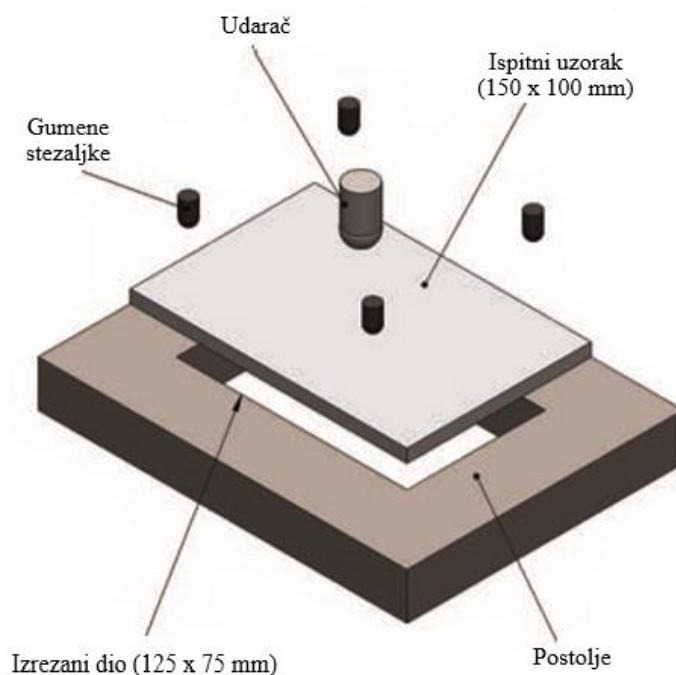
Predmet ovog rada su udarna oštećenja nastala pri malim brzinama udara. Njih karakterizira pojava malih, gotovo nevidljivih udubina na površini materijala uslijed pucanja vlakana i loma matrice, te naravno oku nevidljivih delaminacija [19]. Prema [20], pucanje matrice u blizini međuslojnog područja predstavlja mjesto inicijacije odvajanja slojeva, te pucanje matrice ne utječe puno na smanjenje krutosti kompozita, već upravo pojava velikih, trenutačnih delaminacija u trenutku kada se postigne najveća sila udara jer nakon toga reakcijske sile u kompozitu opadaju uslijed smanjenja krutosti. Slika 8. prikazuje savijanje kompozitne konstrukcije prilikom udara pri malim brzinama, pri čemu se izraženo pucanje matrice uz veće delaminacije javlja na donjem dijelu konstrukcije zbog velikih vlačnih naprezanja [21].



Slika 8. Savijanje i pucanje matrice prilikom udara pri malim brzinama [21]

Eksperiment se provodi u tornju s vodilicama gdje se udarač pušta da pada uslijed djelovanja gravitacije (eng. *Drop – weight tower*). Prema autorima članka, ispitivanja su provedena prema standardnoj testnoj metodi u Instron CEAST 9350 tornju za udarna ispitivanja uz korištenje CEAST DAS 64K uređaja za prikupljanje podataka. Udarač je cilindričnog tijela s kuglastim krajem promjera 20 mm i mase 5,02 kg, a kinetička energija udara iznosi 45,5 J što odgovara brzini udarača od 4,25 m/s. Kinetička energija udara odabrana je prema ASTM D7136 testnom

standardu za debljinu izrađenih uzoraka. Ova vrsta ispitivanja zahtijeva specijalan način učvršćenja ispitnih uzoraka što prikazuje Slika 9. Ispitni uzorci postavljaju se na postolje s izrezanim središnjim dijelom dimenzija 125 x 75 mm, te se osiguravaju s gumenim stezaljkama koje stvaraju minimalnu silu stezanja od 1100 N [22]. Na ovaj način spriječeno je podizanje slojeva na rubovima uzorka uz omogućenu rotaciju, a središnji dio slobodan je progibati se i rotirati sukladno gibanju udarača.

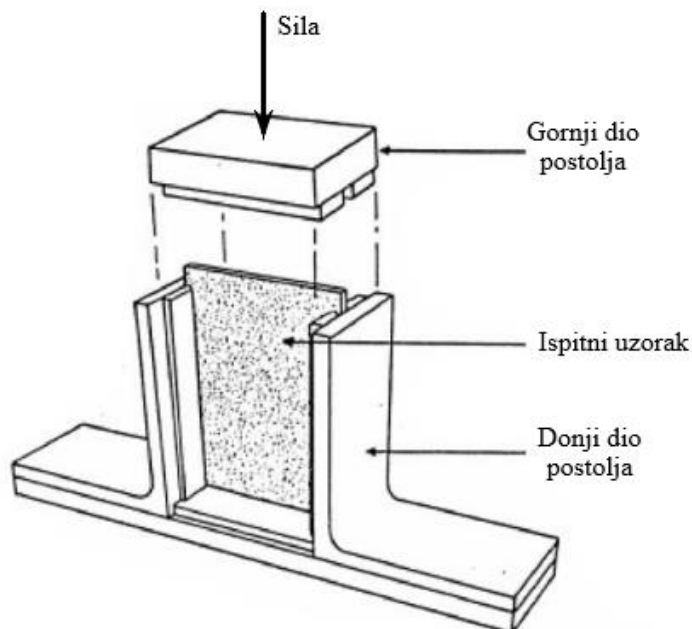


Slika 9. Rubni uvjeti eksperimentalnog ispitivanja udara pri malim brzinama [22]

3.3. Tlačni test nakon udara

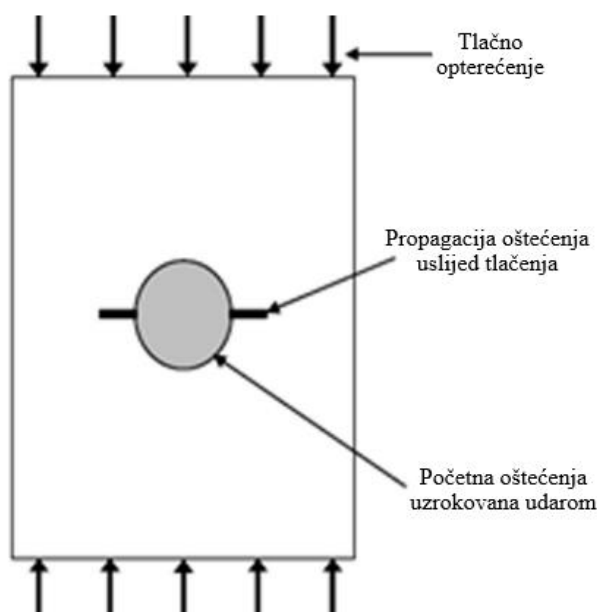
Kompoziti izloženi udaru pri malim brzinama skloni su pojavi već spomenutih oštećenja vlakana i matrice te stvaranju delaminacija između slojeva s različitim orijentacijama vlakana. Zbog navedenih oštećenja znatno se smanjuju mehanička svojstva materijala, a pojava delaminacija direktno utječe na smanjenje tlačne čvrstoće, mehaničkog svojstva koje najviše degradira nakon udara. Kako bi se provjerilo može li nakon oštećenja materijal podnijeti predviđena opterećenja u normalnim uvjetima uporabe, potrebno je poznavati preostalu tlačnu čvrstoću. Preostala tlačna čvrstoća dobiva se eksperimentalnim tlačnim ispitivanjem nakon udara (eng. *Compression After Impact - CAI*), koje se provodi prema testnom standardu ASTM D7137. Ispitivanje se provodi na hidrauličkoj preši s uzorkom postavljenim u posebno postolje prema Slika 10., pri brzini pomaka glave hidraulične preše od 0,5 mm/s [17]. Na ovaj način donjem dijelu ispitnog uzorka onemogućeno je gibanje i rotacija u svim smjerovima osim u bočnom – lijevo/ desno, kako bi se omogućilo istezanje materijala. Bočne stranice imaju

spriječeno gibanje u smjeru okomitom na ravninu laminata uz omogućeno gibanje gore/ dolje i lijevo/ desno kako bi se omogućilo tlačenje odnosno istezanje materijala. Gornji dio laminata ima spriječeno gibanje samo u smjeru okomitom na ravninu laminata. Ovakav način oslanjanja ispitnog uzorka sprječava pojavu izvijanja ploče prilikom ispitivanja.



Slika 10. Postolje ispitnog uzorka za tlačni test nakon udara [23]

Slika 11. prikazuje ploču podvrgnutu tlačnom testu. Na shematskom prikazu se vide početna oštećenja (delaminacije) uzrokovana udarnim opterećenjem i tipična propagacija oštećenja (okomito na smjer opterećenja) prilikom tlačenja ploče.



Slika 11. Propagacija početnih oštećenja prilikom tlačnog testa [19]

4. OŠTEĆENJA KOMPOZITA I MODELI OŠTEĆIVANJA

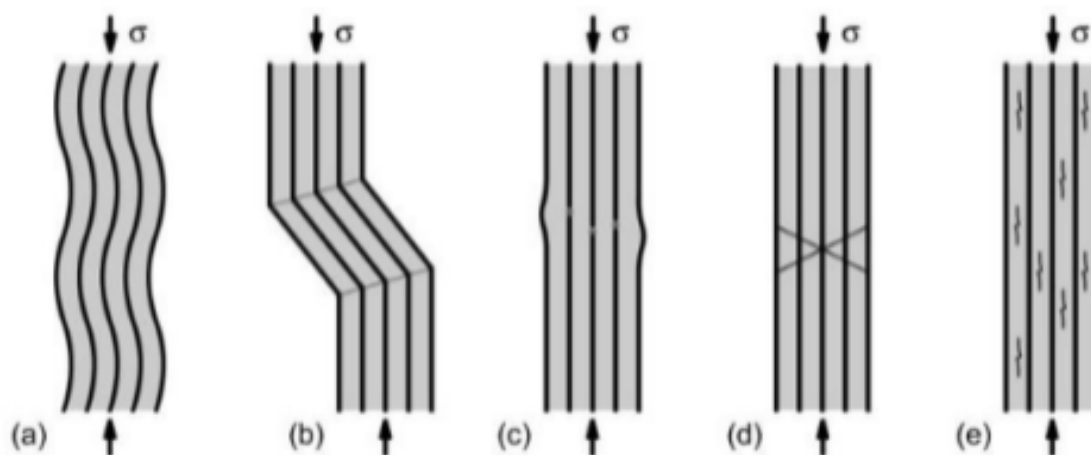
S obzirom na to da se kompozitni materijali sastoje od više konstituenata, za očekivati je da postoji i više mehanizama oštećenja. Oštećenja kompozita mogu biti intralaminarna i interlaminarna. Kod intralaminarnih oštećenja pukotina se nalazi unutar sloja kompozitne konstrukcije, dok se kod interlaminarnih oštećenja pukotina nalazi između dva susjedna sloja unutar međufaznog odnosno međuslojnog područja.

4.1. Intralaminarna oštećenja

Kod intralaminarnih oštećenja razlikuju se:

- izvijanja vlakana
- izvlačenja vlakana
- pucanja vlakana
- odvajanje matrice i vlakana
- lom matrice.

Slika 12. prikazuje prethodno navedene slučajeve oštećenja kompozita u slučaju tlačnog opterećenja.



Slika 12. Načini popuštanja tlačno opterećenog kompozita, a), b) izvijanje vlakana, c) pucanje vlakana, d) lom matrice, e) odvajanje matrice i vlakana [24]

Za predviđanje intralaminarnih oštećenja danas postoje razni matematički modeli koji se nazivaju kriterijima popuštanja. Neki od postojećih kriterija popuštanja su specifični i primjenjivi u posebnim uvjetima, dok su drugi općenitiji i prihvaćeni kako u industrijskim, tako i u akademskim krugovima.

Najpoznatiji i najčešće korišteni kriteriji popuštanja su [4]:

- kriterij maksimalnih naprezanja
- kriterij maksimalnih deformacija
- Tsai-Hill kriterij
- Tsai-Wu kriterij
- Puck-ov kriterij
- Hashin-ov kriterij popuštanja.

Od prethodno navedenih kriterija neki su primjenjivi samo na jednoosno stanje naprezanja poput kriterija maksimalnih naprezanja i maksimalnih deformacija jer za višeosno stanje naprezanja nisu pouzdani. Nadalje, kriteriji Tsai-Hill i Tsai-Wu primjenjivi su za višeosno stanje naprezanja te daju pouzdane rezultate, ali oni daju samo iznos maksimalnog naprezanja pri kojem će sloj popustiti bez govora o načinu kako će sloj popustiti. Konačno, za razliku od prethodno navedenih kriterija, Hashin-ov kriterij primjenjiv je u višeosnom stanju naprezanja jer osim pouzdanih rezultata pruža i informacije o načinu na koji dolazi do popuštanja kompozitnog sloja.

Hashin-ov kriterij popuštanja za dvodimenzionalno odnosno ravninsko stanje naprezanja implementiran je u programski paket *Abaqus* te je vrlo popularan za korištenje. Upravo zbog toga o njemu će biti riječi u nastavku jer će on biti korišten pri analizi numeričkog modela.

Ovaj kriterij ima prednost što pravi razliku između popuštanja matrice i popuštanja vlakana, a temelji se na tri osnovne pretpostavke:

- Popuštanje kompozitnog materijala ojačanog vlaknima događa se ili u vlaknima ili u matrici. Početak pukotine je lokalni fenomen.
- Kompozit nema slobodnih krajeva niti lokalnih oslabljenja. Prema tome u materijalu postoje samo ravninska naprezanja koja mogu uzrokovati pukotinu.
- Materijal matrice ima manju čvrstoću i krutost od vlakana.

Kako je već rečeno, Hashin-ov kriterij razlikuje popuštanje vlakna i matrice i to u dva slučaja opterećivanja, prilikom vlačnog i tlačnog opterećenja. Za korištenje kriterija potrebno je poznavati sljedeće parametre čvrstoće materijala [4]:

- X_t – vlačna čvrstoća u smjeru vlakna
- X_c – tlačna čvrstoća u smjeru vlakna
- Y_t – vlačna čvrstoća u smjeru okomitom na vlakna
- Y_c – tlačna čvrstoća u smjeru okomitom na vlakna
- S – smična čvrstoća.

Uz korištenje navedenih parametara čvrstoće materijala i poznavanje naprezanja moguće je odrediti hoće li doći do popuštanja materijala i na koji način. Bitno je napomenuti da se kriterij koristi uvijek za jedan sloj, a ne za cijeli laminat. Prema autoru kriterija, Z. Hashin-u kriterij je prvenstveno osmišljen za predviđanje popuštanja jednousmjerenih kompozitnih slojeva u slučaju ravninskog stanja naprezanja [25], a glasi:

- Za vlačno opterećenje vlakna ($\sigma_1 > 0$):

$$\left(\frac{\sigma_1}{X_t}\right)^2 + \alpha \left(\frac{|\tau_{12}|}{S_{12}}\right)^2 < 1, \quad (1)$$

gdje je σ_1 naprezanje u smjeru glavne materijalne osi 1, α je parametar koji definira udio smičnog naprezanja na inicijaciju oštećenja i može biti između 0 i 1, τ_{12} je smično naprezanje u ravnini sloja, a X_t i S_{12} su parametri čvrstoće.

- Za tlačno opterećenje vlakna ($\sigma_1 < 0$):

$$\left(\frac{\sigma_1}{X_c}\right)^2 < 1. \quad (2)$$

- Za vlačno opterećenje matrice ($\sigma_2 > 0$):

$$\left(\frac{\sigma_2}{Y_t}\right)^2 + \left(\frac{|\tau_{12}|}{S_{12}}\right)^2 < 1, \quad (3)$$

gdje je σ_2 naprezanje u smjeru glavne materijalne osi 2, a Y_t je parametar čvrstoće.

- Za tlačno opterećenje matrice ($\sigma_2 < 0$):

$$\left(\frac{\sigma_2}{2S_{23}}\right)^2 + \left[\frac{Y_c}{2S_{23}} - 1\right] \frac{\sigma_2}{Y_c} + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 < 1. \quad (4)$$

Kada su zadovoljene nejednadžbe (1), (2), (3) i (4) znači da nije došlo do popuštanja, kad je lijeva strana navedenih nejednadžbi jednaka 1, znači da je došlo do inicijacije oštećenja, a kada je lijeva strana nejednadžbi veća od 1 znači da je došlo do popuštanja materijala. Unutar programskog paketa *Abaqus*, ukoliko nije definirana propagacija odnosno širenje oštećenja (eng. *Damage evolution*) iznosi kriterija veći od 1 govore koliko je puta naprezanje veće od onog graničnog, kod kojeg dolazi do inicijacije oštećenja. Ako se definira propagacija oštećenja onda iznos kriterija popuštanja ne može prekoračiti 1.

U sklopu programskog paketa, naprezanja sadržana unutar kriterija popuštanja navedenima u izrazima (1), (2), (3) i (4) su komponente efektivnog tenzora naprezanja i uzimaju u obzir oštećenje materijala [26]. Efektivan tenzor naprezanja računa se prema [26], kao:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{M} \cdot \boldsymbol{\sigma}_0, \quad (5)$$

gdje je $\boldsymbol{\sigma}_0$ tenzor nominalnih, stvarnih naprezanja, a \mathbf{M} je matrica operatora oštećenja i definirana je kao:

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

gdje su d_f , d_m i d_s unutarnje varijable koje definiraju oštećenja vlakna, matrice i smičnog oštećenja i računaju se iz slijedećih izraza:

$$d_f = \begin{cases} d_f^t & \text{za } \sigma_1 > 0, \\ d_f^c & \text{za } \sigma_1 < 0, \end{cases} \quad (7)$$

$$d_m = \begin{cases} d_m^t & \text{za } \sigma_2 > 0, \\ d_m^c & \text{za } \sigma_2 < 0, \end{cases}$$

$$d_s = 1 - (1 - d_f^t) \cdot (1 - d_f^c) \cdot (1 - d_m^t) \cdot (1 - d_m^c),$$

gdje su d_f^t , d_f^c , d_m^t i d_m^c varijable oštećenja koje odgovaraju svakom od četiri navedena kriterija popuštanja po Hashin-u.

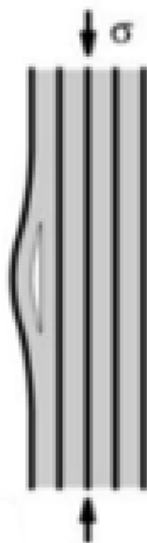
Dok nije došlo do inicijacije oštećenja po nijednom od četiri kriterija, matrica \mathbf{M} je jedinična matrica i efektivan tenzor naprezanja $\boldsymbol{\sigma}$ jednak je tenzoru nominalnih naprezanja $\boldsymbol{\sigma}_0$ u matričnoj jednadžbi (5). Kada dođe do inicijacije prvih oštećenja, barem po jednom od četiri navedena kriterija, matrica \mathbf{M} više nije jedinična i služi za određivanje efektivnog tenzora naprezanja čije se komponente dalje koriste u ostalim kriterijima za popuštanje vlakna i matrice [26].

4.2. Interlaminarna oštećenja

Pod pojmom interlaminarnih oštećenja smatra se odvajanje slojeva odnosno delaminacije, o čemu je već bilo riječi u poglavlju 2. Slika 13. prikazuje tlačno opterećen laminat u kojem je došlo do pojave delaminacija.

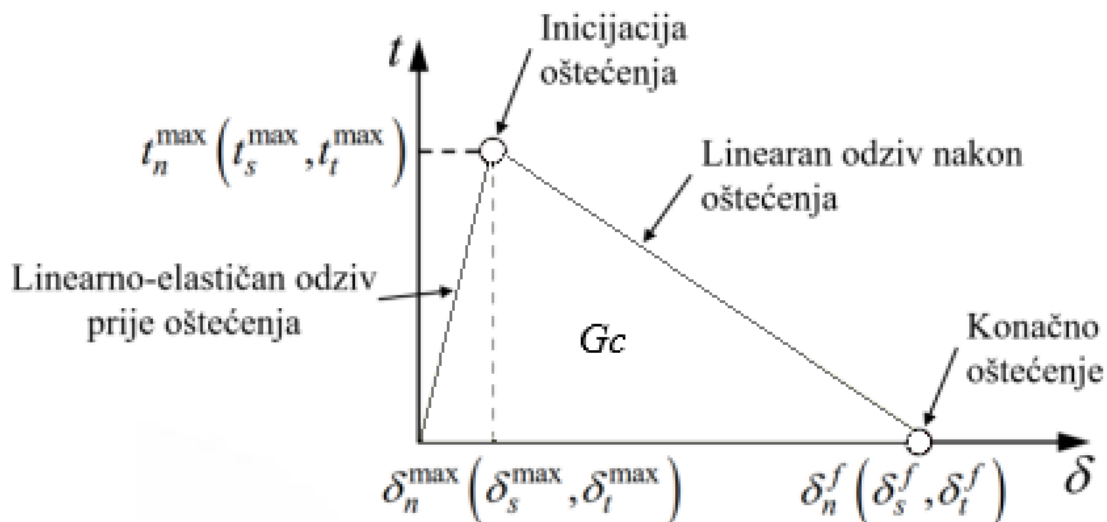
Programski paket *Abaqus* nudi dvije opcije kojima je moguće modelirati međuslojno područje gdje se pojavljuju delaminacije, a obje opcije spadaju pod metodu kohezivne zone (eng. *Cohesive Zone Method – CZM*) i baziraju se na zakonu naprezanja-odvajanja (eng. *Traction - separation law*). Prvi način je modeliranje kohezivnih površina u *Interaction* modulu unutar programskog paketa, gdje se između odabranih površina definira svojstvo interakcije po navedenom zakonu. Drugi način je modeliranje kohezivne zone korištenjem posebnih kohezivnih elemenata (eng. *Cohesive elements*). Općenito govoreći, ovaj konstitutivni model

nije primjenjiv samo za opisivanje delaminacija između kompozita, već generalno služi za opisivanje ljepljenih spojeva.



Slika 13. Delaminacije tlačno opterećenog laminata [24]

Korištenjem navedenog konstitutivnog modela u programskom paketu *Abaqus*, moguće je definirati linearan odziv prije i nakon pojave oštećenja ili linearan odziv prije, a eksponencijalan odziv nakon oštećenja. U ovom radu bit će korišten linearan odziv prije i nakon inicijacije oštećenja (linearno mekšanje materijala), ovako definiran zakon kohezivne zone još se naziva i bilinearan zakon naprezanja – odvajanja, a prikazan je na slici 14.



Slika 14. Bilinearan zakon naprezanja – odvajanja [26]

Veličine koordinatnih osi t i δ na slici odnose se na sile i odvajanje (pomake), a njihovim karakterističnim točkama t_i^{\max} , δ_i^{\max} i δ_i^f definiran je trokut čija površina označava energiju loma materijala. Indeks $i = n, s, t$ označava karakteristične smjerove naprezanja materijala, gdje je n smjer normale, a s i t su preostala dva smjera prema desnom Kartezij-evom koordinatnom

sustavu. Eksponent m odnosi se na maksimalan (eng. *Maximal*) iznos naprezanja/ odvajanja, a eksponent f odnosi se na konačno odvajanje (eng. *Final*). Osim definiranja zakona kohezivnosti, odnosno zakona naprezanja – odvajanja, potrebno je definirati i zakon prema kojem će doći do inicijacije oštećenja. *Abaqus* nudi četiri zakona za definiranje inicijacije oštećenja, a to su:

- zakon maksimalnih nominalnih naprezanja (eng. *Maximum nominal stress*)
- zakon maksimalnog odvajanja (eng. *Maximum separation*)
- zakon kvadratnog naprezanja (eng. *Quadratic traction*)
- zakon kvadratnog odvajanja (eng. *Quadratic separation*)

za korištenje svojstva interakcije (eng. *Interaction property*) i kohezivnih površina, te:

- zakon maksimalnih nominalnih naprezanja
- zakon maksimalnih nominalnih deformacija (eng. *Maximum nominal strain*)
- zakon kvadratnog nominalnog naprezanja (eng. *Quadratic nominal stress*)
- zakon kvadratnih nominalnih deformacija (eng. *Quadratic nominal strain*)

za korištenje kohezivnih elemenata.

U ovom radu odabrani su zakoni kvadratnog naprezanja za kohezivne površine i zakon kvadratnog nominalnog naprezanja za kohezivne elemente, što je prema [26] ustvari jedan te isti zakon definiran kao:

$$\left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^{\max}} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^{\max}} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_t}{t_t^{\max}} \right\}^2 = 1, \quad (8)$$

gdje se u zagradama nalazi omjer nominalnih i maksimalno dozvoljenih naprezanja za sva tri definirana smjera. Kada lijeva strana jednadžbe (8) postigne vrijednost 1, znači da je došlo do inicijacije oštećenja u kohezivnom sloju. U prethodnoj jednadžbi pojavljuje se simbol $\langle * \rangle$ koji označava Macaulay-ev operator koji glasi:

$$\langle * \rangle = \frac{(* + |*|)}{2}, \quad (9)$$

gdje se $*$ odnosi na korištenu veličinu.

Konačno, da bi se u potpunosti definiralo ponašanje kohezivnog sloja prilikom oštećivanja, potrebno je još definirati i zakon za propagaciju oštećenja nakon inicijacije. Kako je već spomenuto, odabrana je linearna propagacija oštećenja, odnosno linearno mekšanje materijala. Postoje i drugi oblici propagacije oštećenja u *Abaqus* – u, poput eksponencijalnog i polinomnog (opcija *Tabular* u *software* – u). Nadalje, odabran je energijski način gdje se unose energije loma $G_{i,c}$ uz $i = I, II, III$, definirane trokutom na slici 14. za sva tri smjera (tri načina loma),

koje služe za izračun energije potrebne za propagaciju nakon što je nastupila inicijacija oštećenja [26]. U radu će se koristiti Benzeggagh-Kenane (BK) kriterij za izračun energije propagacije oštećenja koji se koristi kada su energije loma u oba smična smjera iste, što je slučaj u ovom radu. Prema [26], navedeni kriterij glasi:

$$G_n^C + (G_S^C - G_n^C) \cdot \left\{ \frac{G_S}{G_n^C + G_S} \right\}^\eta = G^C, \quad (10)$$

gdje je $G_n^C = G_{Ic}$, η je parametar materijala, G^C je energija potrebna za propagaciju oštećenja, a G_S je definiran kao:

$$G_S = G_S^C + G_t^C, \quad (11)$$

gdje je $G_S^C = G_{IIc}$ i $G_t^C = G_{IIIc} = G_{IIc}$.

Dakle, pomoću zakona naprezanje – odvajanje, zakona kvadratnog naprezanja odnosno kvadratnog nominalnog naprezanja za opisivanje inicijacije oštećenja i linearnog energijskog Benzeggagh-Kenane kriterija za opisivanje propagacije oštećenja u potpunosti je moguće opisati kohezivno ponašanje između slojeva laminata preko kohezivnih površina i uz korištenje kohezivnih konačnih elemenata.

5. NUMERIČKI MODEL

Numerički model izrađen je u komercijalnom programskom paketu *Abaqus* koji za rješavanje raznih problema koristi metodu konačnih elemenata preko koje se modelirani kontinuum s beskonačno stupnjeva slobode diskretizira manjim, konačnim brojem podkontinuumata odnosno konačnih elemenata. Ovom metodom moguće je približno, ali dovoljno točno odrediti polje pomaka, naprezanja, deformacija i drugih veličina razmatranog problema koje se opisuju interpolacijskim funkcijama. Te funkcije moraju zadovoljavati određene uvjete kako bi se diskretizirani sustav što više približio ponašanju realnog sustava. Uz pravilnu formulaciju konačnih elemenata približavanje točnom rješenju raste s povećanjem broja konačnih elemenata [27].

Abaqus korisniku nudi dva rješavača (eng. *Solver*), *Abaqus/ Standard* i *Abaqus/ Explicit* od koji svaki ima svoje prednosti i namjenu ovisno o problemu koji se razmatra. Uobičajeno je da se *Abaqus/ Standard* koristi za rješavanje statičkih linearnih i kontinuiranih nelinearnih problema, iako je moguće i rješavanje linearnih dinamičkih problema poput analize frekvencija. Za neke statičke nelinearne probleme mogući su problemi s konvergencijom rješenja, pa je tada nužno koristiti *Abaqus/ Explicit* rješavač koji se uobičajeno koristi za rješavanje diskontinuiranih nelinearnih problema s velikim pomacima i tranzijentnih dinamičkih problema. Što se tiče memorijskog prostora potrebnog za pohranu *Abaqus/ Explicit* povoljnija je opcija, međutim dostupan je manji broj konačnih elemenata nego u *Abaqus/ Standard* rješavaču.

Obzirom da se u ovom radu razmatra dinamički problem udara, bit će korišten *Explicit* rješavač, koji je pogodan i za analizu kvazi – statičkog tlačnog ispitivanja jer se njegovim korištenjem otklanjaju potencijalni problemi pri konvergenciji rješenja i štedi se na memorijskom prostoru potrebnom za pohranu rezultata, što je izrazito bitno u ovom slučaju jer se radi o složenoj numeričkoj analizi u više koraka. Nadalje, obzirom da se razmatra višeslojna kompozitna konstrukcija odabrani rješavač pogodniji je za opisivanje složenih kontakata koji se javljaju u ovakvim konstrukcijama, a pruža i mogućnost korištenja modela oštećivanja navedenih u potpoglavljima 4.1 i 4.2.

5.1. *Abaqus/ Explicit* rješavač

Za razliku od *Standard* rješavača koji rješenje nelinearnih problema pronalazi iteriranjem, a pri svakoj iteraciji se rješava velik broj linearnih jednadžbi, *Explicit* rješavač do rješenja dolazi bez iterativnog procesa, eksplicitno napredujući s kinematskim stanjem iz prethodnog inkrementa

prema sljedećem stanju [26]. Zadano vrijeme dinamičke eksplicitne analize diskretizira se velikim brojem vrlo malih vremenskih inkremenata koji se rješavaju korištenjem numeričke integracije koja se temelji na metodi središnje razlike. Integracija metodom središnje razlike je eksplicitna, jer se kinematičko stanje u novom vremenskom inkrementu određuje pomoću ubrzanja i brzine čvorova na kraju prethodnog vremenskog inkrementa.

Stabilno, pravo rješenje dobiva se samo kada je vremenski inkrement manji od graničnog vremenskog inkrementa. Stabilni vremenski inkrement se prema [26] računa kao:

$$\Delta t \approx \frac{L_{e,min}}{c_d}, \quad (12)$$

gdje je Δt približni stabilni vremenski inkrement, $L_{e,min}$ je duljina najkraće stranice najmanjeg konačnog elementa u diskretiziranom modelu, a c_d je brzina širenja dilatacijskih valova kroz materijal. Izraz (12) može se zapisati i na drugi način [26] kao:

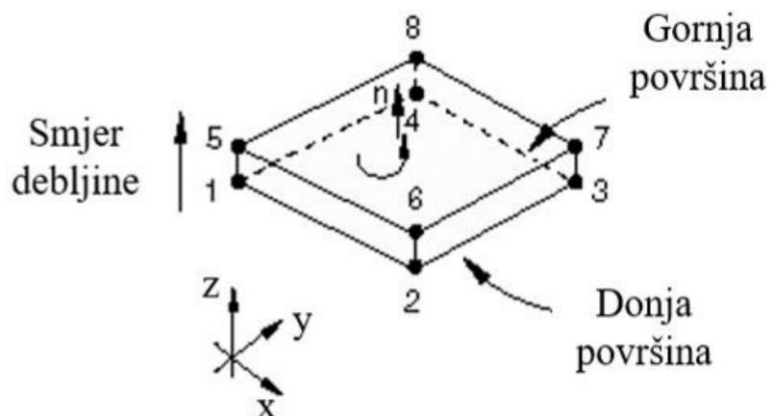
$$\Delta t \approx L_{e,min} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\lambda + 2\mu}}, \quad (13)$$

gdje je ρ gustoća najmanjeg konačnog elementa u generiranoj mreži, a λ i μ su Lamé-ove konstante vezane uz materijal konačnog elementa. Iz izraza (13) vidljivo je da na stabilni vremenski inkrement utječe gustoća korištenog materijala pri čemu povećanje gustoće povećava stabilni vremenski inkrement što uvjetuje i kraće vrijeme rješavanja problema. *Abaqus* pri korištenju eksplicitnog rješavača nudi opciju skaliranja mase (eng. *Mass scaling*) koja služi za umjetno povećanje gustoće materijala odabranih elemenata ili cjelokupne mreže konačnih elemenata upravo u svrhu povećanja stabilnog vremenskog inkrementa. Korištenju ove opcije treba pristupiti oprezno jer može dovesti do značajnog povećanja inercijskih sila, a sukladno tome i do vrlo pogrešnih, nefizikalnih rezultata [26]. U ovom radu opcija *Mass scaling* nije korištena.

5.1.1. SC8R konačni elementi

Općenito govoreći preporučljivo je da se ljuskasti elementi upotrebljavaju za diskretizaciju kontinuuma čija je debljina znatno manja od preostalih dimenzija. Eksplicitni rješavač nudi opciju korištenja trodimenzionalnih heksaedarskih kontinuumskih ljuskastih konačnih elemenata s reduciranom integracijom (eng. *Continuum shell finite element*) SC8R, što znači da imaju samo jednu točku integracije na sredini srednje plohe konačnog elementa. Iako su ovi elementi trodimenzionalni, njihova matematička formulacija više naginje onoj za konvencionalne dvodimenzionalne ljuskaste elemente. Za razliku od njih, ljuskasti elementi imaju samo translacijske stupnjeve slobode u čvorovima, ukupno osam stupnjeva slobode

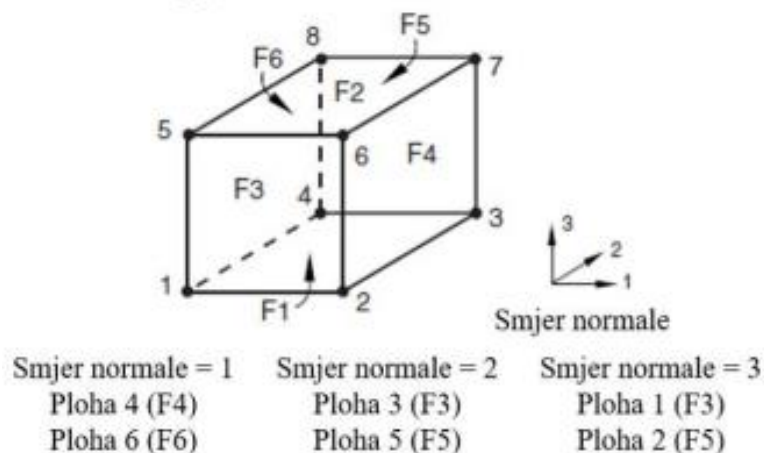
gibanja. Nadalje, trodimenzionalni kontinuumski ljuskasti elementi u usporedbi s konvencionalnim dvodimenzijским ljuskastim elementima pokazuju bolju sposobnost opisivanja polja (na primjer, naprezanja, deformacija i pomaka) kompozitnih konstrukcija po debljini, također i točniji odziv konstrukcije prilikom kontakta. Slika 15. prikazuje trodimenzionalni heksaedarski konačni element s numeracijom čvorova i definiranom normalom. Smjer normalne određuju se pravilom desne ruke ovisno o numeraciji čvorova, počevši od manjeg broja prema višem.



Slika 15. Trodimenzionalni heksaedarski ljuskasti konačni element [26]

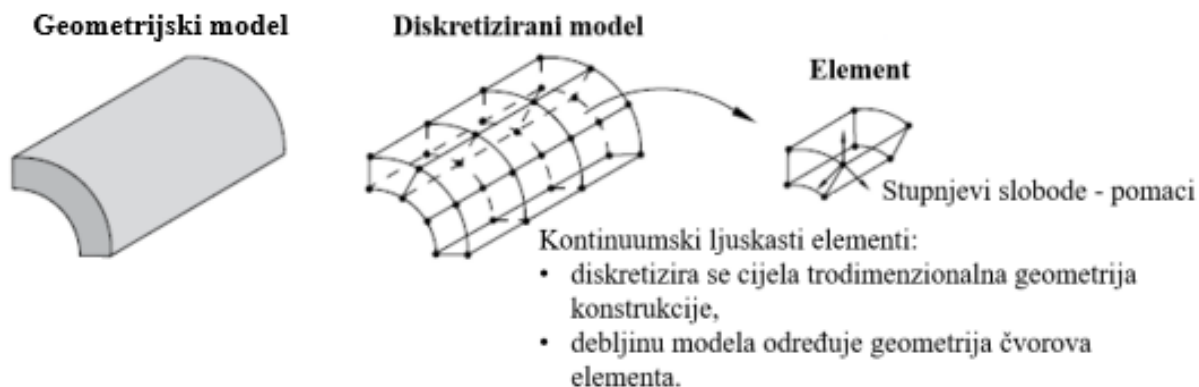
Bitno je napomenuti kako je važno voditi računa o postavljenom smjeru normale, kako bi se ljuskasta konstrukcija pravilno opisala jer je smjerom normale definiran i smjer debljine elementa, a ponašanje elementa u smjeru debljine drugačije je od onog u ravnini elementa [26]. Pravilna usmjerenost normala posebice je bitna kada je riječ o kompozitnim konstrukcija jer se kontinuum gotovo uvijek diskretizira s većim brojem elemenata po debljini konstrukcije. Slika 16. prikazuje SC8R element i moguće smjerove normala na plohe.

Ploha = F - eng. *face*



Slika 16. Mogući smjerovi normale SC8R konačnog elementa [26]

Ovaj tip elemenata izrazito je pogodan za opisivanje kompozitnih konstrukcija jer može vrlo dobro opisati zakrivljene kontinuumne i to bez dodatnog definiranja debljine ljuske (automatski se definira prema geometriji modela), te je vrlo praktično jedan sloj diskretizirati s jednim ljuskastim elementom po debljini, pri čemu je vrlo važno pripaziti da su ispravno definirane normale svih slojeva. Slika 17. prikazuje primjer diskretizacije zakrivljenog kontinuuma.



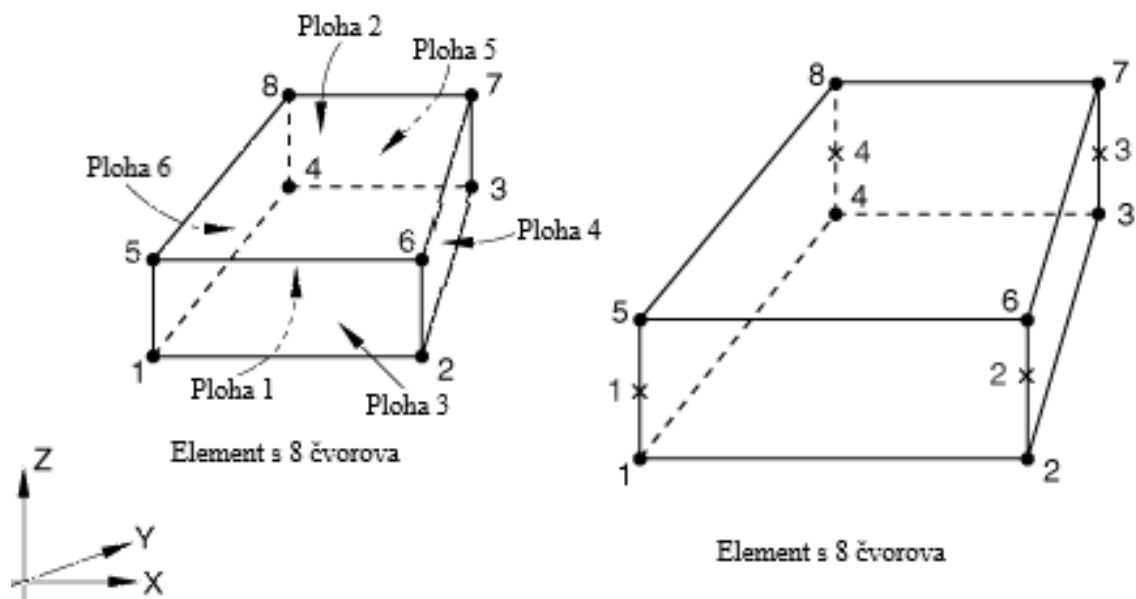
Slika 17. Primjer diskretizacije zakrivljenog kontinuuma [26]

5.1.2. COH3D8 konačni elementi

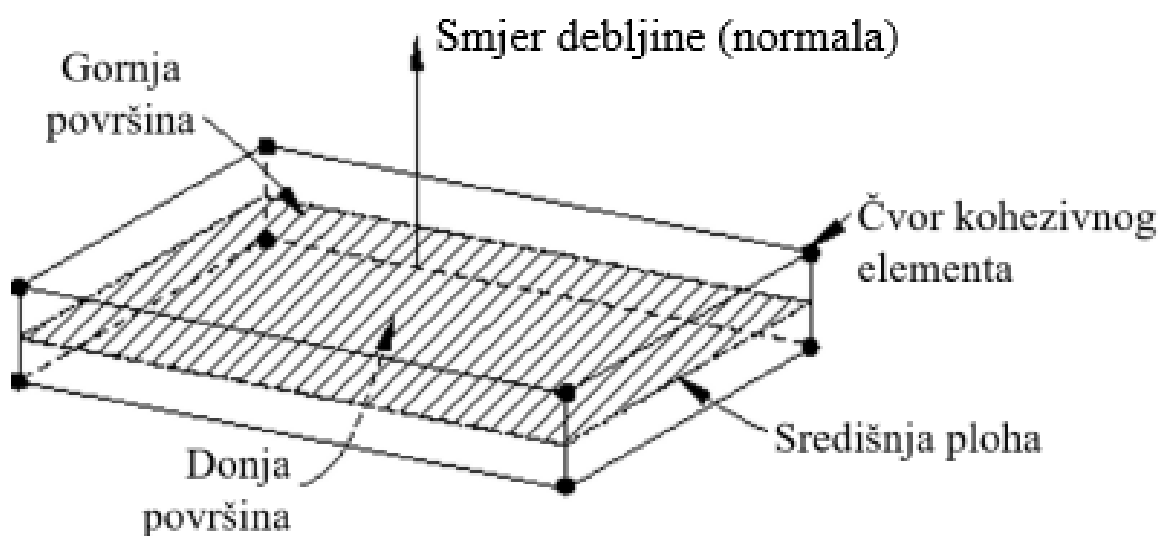
Programski paket *Abaqus* sadrži tri tipa kohezivnih konačnih elemenata [26]:

- trodimenzionalni kohezivni element (COH3D6, COH3D8)
- dvodimenzionalni kohezivni elementi (COH2D4)
- osnosimetrični kohezivni elementi (COHAX4, COHAX6).

U ovom radu bit će korišteni trodimenzionalni kohezivni elementi s osam čvorova COH3D8, gdje svaki čvor ima tri translacijska stupnja slobode gibanja. Ovaj tip kohezivnih elemenata odabran je iz razloga što im broj čvorova odgovara broju čvorova trodimenzionalnih heksaedarskih kontinuumskih ljuskastih elemenata, što osigurava dobro povezivanje istih. Uz to, kohezivni sloj modeliran je s konačnom debljinom. Prema početnim postavkama programskog paketa pri korištenju zakona naprezanje-odvajanje početna debljina kohezivnog elemenata postavljena je na nultu vrijednost [26] pa ju je potrebno posebno definirati. Slika 18. prikazuje numeraciju čvorova i ploha (lijevo) te četiri točke integracije smještene po sredini debljine (desno) kohezivnog konačnog elementa. Kao kod prethodno razmatranih trodimenzionalnih heksaedarskih ljuskastih konačnih elemenata i kohezivnim konačnim elementima potrebno je pravilno definirati smjer normale. Prema početnim postavkama programskog paketa, ovaj smjer je definiran pravilom desne ruke u odnosu na numeraciju čvorova (Slika 19.).



Slika 18. Numeracija čvorova, ploha i točaka integracije COH3D8 konačnog elementa [26]
 Smjer normale može se samostalno definirati korištenjem opcije *Assign material orientation* u *Property* modulu. Ovi elementi mogu se razmatrati kao elementi koji su sastavljeni od dviju ploha s čvorovima u vrhovima međusobno razdvojenih za debljinu kohezivnog sloja [26].



Slika 19. Prostorni prikaz COH3D8 kohezivnog konačnog elementa [26]

Kao što je već spomenuto u potpoglavlju 4.2, kohezivni elementi koriste se za modeliranje spoja između komponenti (na primjer, sloja ljepila koje spaja komponente) neovisno o tome jesu li one krute ili deformabilne. Nadalje, koriste se za modeliranje odvajanja slojeva kompozitnih konstrukcija nakon oštećenja kohezivne zone, a glavna prednost njihovog korištenja u ovom slučaju u usporedbi s korištenjem kohezivnih površina je mogućnost modeliranja kohezivne zone s debljinom.

5.2. Definiranje numeričkog modela korištenjem kohezivnih površina za modeliranje kohezivne zone

Kako bi se provele numeričke simulacije za odabrani problem iz literature [17], prvo je potrebno definirati geometriju udarača i višeslojne kompozitne ploče u *Part* modulu. Prema podacima prezentiranim u potpoglavljima 3.1 i 3.2 izrađena su tri geometrijska modela za tri već navedena *cross-ply* rasporeda slojeva s debljinom jednog sloja od 0,86 mm. Sva tri laminata imaju ista mehanička svojstva, a razlikuju se samo po broju međufaznih područja između slojeva s različitom orijentacijom vlakana. Dijelovi laminata koji imaju više od jednog sloja s istom orijentacijom vlakana modelirani su kao jedan trodimenzionalni deformabilni dio (eng. *Part*) s odgovarajućom debljinom, a ovakav način modeliranja često se u literaturi na engleskom jeziku naziva *ply clustering*.

Udarač je modeliran kao kruto tijelo (eng. *Rigid body*) jer se pretpostavlja da bi njegovo deformiranje bilo zanemarivo u usporedbi s kompozitnom pločom, a geometrija mu je oblikovana kao sferna ljuska promjera 20 mm. Nadalje, udaraču je potrebno dodijeliti referentnu točku i svojstvo inercije odnosno masu koja iznosi 5,02 kg.

5.2.1. Modul Property

Nakon što se modelirala geometrija kompozitne ploče i udarača, potrebno je u modulu *Property* definirati materijal. Klikom na opciju *Create material* otvara se skočni prozor *Edit material* gdje se odabire podopcija *Mechanical > Elasticity > Elastic > Engineering constants* i ovdje se unose konstante elastičnosti materijala. Kako je u ovom radu riječ o eksplicitnoj dinamičkoj analizi materijalu je potrebno definirati gustoću klikom na podopciju *Mechanical > Density*. Nadalje, odabirom podopcije *Mechanical > Damage for fiber – reinforced composites > Hashin damage* odabran je kriterij popuštanja vlakna i matrice te se ovdje unose podaci o čvrstoći sloja, a parametar α , spomenut u potpoglavljju 4.1 odabran je kao 1. Kao što je spomenuto u potpoglavljju 3.1, ploče su izrađene od R-staklenih vlakna visoke čvrstoće i modula elastičnosti u kombinaciji s epoksidnom smolom. Mehanička svojstva potrebna za definiranje materijala jednog jednousmjerenog (eng. *Unidirectional*) sloja navedena su tablici 1. prema [17], za korišteni GFRP materijal.

Tablica 1. Mehanička svojstva jednousmjerenog sloja [17]

Mehaničko svojstvo	Oznaka	Jedinica	Vrijednost
Modul elastičnosti u smjeru vlakna	E_1	[GPa]	44,87
Modul elastičnosti okomito na smjer vlakna	E_2	[GPa]	12,13
Modul elastičnosti okomito na ravninu sloja	E_3	[GPa]	12,13
Poisson – ov faktor između glavnih materijalnih osi 1 i 2	ν_{12}	[-]	0,3
Poisson – ov faktor između glavnih materijalnih osi 1 i 3	ν_{13}	[-]	0,3
Poisson – ov faktor između glavnih materijalnih osi 2 i 3	ν_{23}	[-]	0,5
Modul smicanja između glavnih materijalnih osi 1 i 2	G_{12}	[GPa]	3,38
Modul smicanja između glavnih materijalnih osi 1 i 3	G_{13}	[GPa]	3,38
Modul smicanja između glavnih materijalnih osi 2 i 3	G_{23}	[GPa]	3,38
Vlačna čvrstoća u smjeru vlakna	X_t	[MPa]	1006,3
Tlačna čvrstoća u smjeru vlakna	X_c	[MPa]	487
Vlačna čvrstoća u smjeru okomitom na vlakna	Y_t	[MPa]	45,95
Tlačna čvrstoća u smjeru okomitom na vlakna	Y_c	[MPa]	131,9
Smična čvrstoća između glavnih materijalnih osi 1 i 2	S_{12}	[MPa]	49,51
Smična čvrstoća između glavnih materijalnih osi 2 i 3	S_{23}	[MPa]	49,51
Gustoća	ρ	[kg/m ³]	1230

Konačno, da bi se omogućila propagacija oštećenja u numeričkom modelu potrebno je unutar prozora gdje se definiraju parametri čvrstoće za Hashin-ov kriterij kliknuti na podopciju *Suboptions > Damage evolution* gdje se unose potrebne energije loma materijala. Zbog nepostojanja vrijednosti energija loma za korišteni materijal, one su uzete nakon konzultacije s mentorom kao prosječne vrijednosti za ugljičnim vlaknima ojačan kompozit prema [28].

Tablica 2. sadrži odabrane vrijednosti energija loma.

Tablica 2. Odabrane vrijednosti energija loma [28]

Naziv	Oznaka	Jedinica	Vrijednost
Energija loma potrebna za propagaciju vlačnih oštećenja u smjeru vlakna	E_{LT}^F	[kJ/m ²]	81,5
Energija loma potrebna za propagaciju tlačnih oštećenja u smjeru vlakna	E_{LC}^F	[kJ/m ²]	106,5
Energija loma potrebna za propagaciju vlačnih oštećenja okomito na vlakna	E_{TT}^F	[kJ/m ²]	0,27
Energija loma potrebna za propagaciju tlačnih oštećenja okomito na vlakna	E_{TC}^F	[kJ/m ²]	5,62

Nakon što je definiran materijal, potrebno ga je dodijeliti pojedinim slojevima te definirati njihovu orijentaciju, a za to je korištena opcija *Create composite layup*. Unutar skočnog prozora odabire se koordinatni sustav prema kojem će se vršiti orijentacija, a potom se svakom sloju dodjeljuje definirani materijal, debljina (0,86 mm), orijentacija (0° ili 90°) i broj točaka integracije po debljini - u ovom slučaju tri.

5.2.2. Modul Assembly

Nakon modula *Property* slijedi modul *Assembly* u kojem se korištenjem opcije *Create instance > Parts > Instance type dependent* unose izrađeni geometrijski modeli u sklop. Sljedeće što treba napraviti je postavljanje svih dijelova u točan položaj korištenjem opcija *Translate instance* i *Rotate instance*.

5.2.3. Modul Step

Sljedeći po redu je modul *Step* unutar kojeg se pritiskom na opciju *Create step > Dynamic Explicit* stvaraju tri eksplicitna koraka:

- korak 1 – za udar pri malim brzinama (vrijeme koraka 6 ms)
- korak 2 – za stabilizaciju modela (vrijeme koraka 0,1 ms)
- korak 3 – tlačno ispitivanje nakon udara (vrijeme koraka 8 ms).

Prvi i treći korak numeričke analize već je objašnjen u potpoglavljima 3.2 i 3.3, a drugi korak, korak stabilizacije provodi se u svrhu otklanjanja zaostalih vibracija uzrokovanih udarom kako iste ne bi utjecale na rezultate tlačnog ispitivanja. Pritiskom opcije *Create field output* otvara se iskočni prozor u kojem je potrebno izabrati izlazne varijable analize, broj intervala zapisivanja rezultata te točke integracije za ispis rezultata. Odabran je broj od 50 jednako razmaknutih vremenskih intervala zapisivanja rezultata po koraku i samo točke integracije u sredini sloja. Pod kategorijom *Failure/ Fracture* označena je varijabla *DMICRT* koja uključuje

sva četiri kriterija popuštanja prema Hashin-u, kao i varijabla *CSQUADSCRT* koja se odnosi na kriterij inicijacije oštećenja preko zbroja kvadrata naprežanja za kohezivne površine. Za praćenje ukupnog oštećenja na kohezivnim površinama potrebno je označiti varijablu *CSDMG* pod kategorijom *Failure/ Fracture*. U istoj kategoriji odabrane su još i izlazne varijable oštećenja za vlaknima ojačane kompozite, *DAMAGEFT*, *DAMAGEFC*, *DAMAGEMT* i *DAMAGEMC*, koje se odnose na vlačno/ tlačno oštećenje vlakna odnosno matrice. Kako bi se omogućilo praćenje stanja pojedinih konačnih elemenata u smislu oštećenja i omogućilo njihovo brisanje iz mreže nakon potpune degradacije, potrebno je pod kategorijom *State/ Field/ User/ Time* označiti varijablu *STATUS*. Konačno, korištenjem opcije *Create history output* traži se zapisivanje pomaka i reakcijskih sila u 1000 jednako razmaknutih intervala za referentnu točku udarača i točku u kojoj se narine pomak prilikom tlačnog ispitivanja nakon udara.

5.2.4. Modul Interaction

Idući na redu je modul *Interaction*, ovdje se odabirom opcije *Create constraint > Rigid body* definira ograničenje krutog tijela udarača, pri čemu je referentna točka udarača odabrana kao kontrolna točka, a geometrija kugle je kontrolirana njezinim kretanjem. Da bi se definirali uvjeti ostvarivanja kontakta između komponenti u sklopu, potrebno je odabrati opciju *Create interaction property*. Prvo se definira svojstvo interakcije za opisivanje kontakta između udarača i laminata i to u normalnom i tangencijalnom smjeru. Odabirom opcije *Mechanical > Normal behavior* definira se ostvarivanje „tvrdog kontakta“ (eng. *Hard contact*), a pod *Mechanical > Tangential behavior* definira se *Friction formulation > Penalty* te se unosi odabrani faktor trenja 0,3 prema [17]. Potrebno je još definirati svojstvo interakcije između kompozitnih slojeva s različitom orijentacijom vlakana na isti način. Uz *Normal behavior* i *Tangential behavior* za ovo svojstvo interakcije potrebno je još definirati kohezivno ponašanje odabirom opcije *Mechanical > Cohesive behavior*, a za oštećenje kohezivnog sloja *Mechanical > Damage*. Unutar izbornika za *Cohesive behavior* pod kategorijom *Eligible slave nodes* odabire se opcija *Only slave nodes initially in contact*, što znači da će se kohezivno svojstvo definirati samo za čvorove na površinama koje su na početku simulacije u dodiru. Nadalje, unutar istog izbornika pod kategorijom *Traction – separation behavior* označi se opcija *Specify stiffness coefficients > Uncoupled* čime se omogućava kohezivno ponašanje u normalnom, ali i u tangencijalnim smjerovima [26], pa je ovdje potrebno unijeti koeficijente krutosti kohezivnog sloja. Konačno, unutar izbornika *Damage* uključuje se opcija *Damage evolution* gdje je potrebno unijeti energije loma objašnjene u potpoglavlju 4.2, a pod kategorijom *Damage initiation* odabire se *Quadratic traction* gdje se unose čvrstoće kohezivnog sloja za tri

karakteristična smjera. Podaci potrebni za definiranje prethodno navedenih opcija preuzeti su iz [17] za korišteni materijal, a navedena su u tablici 3.

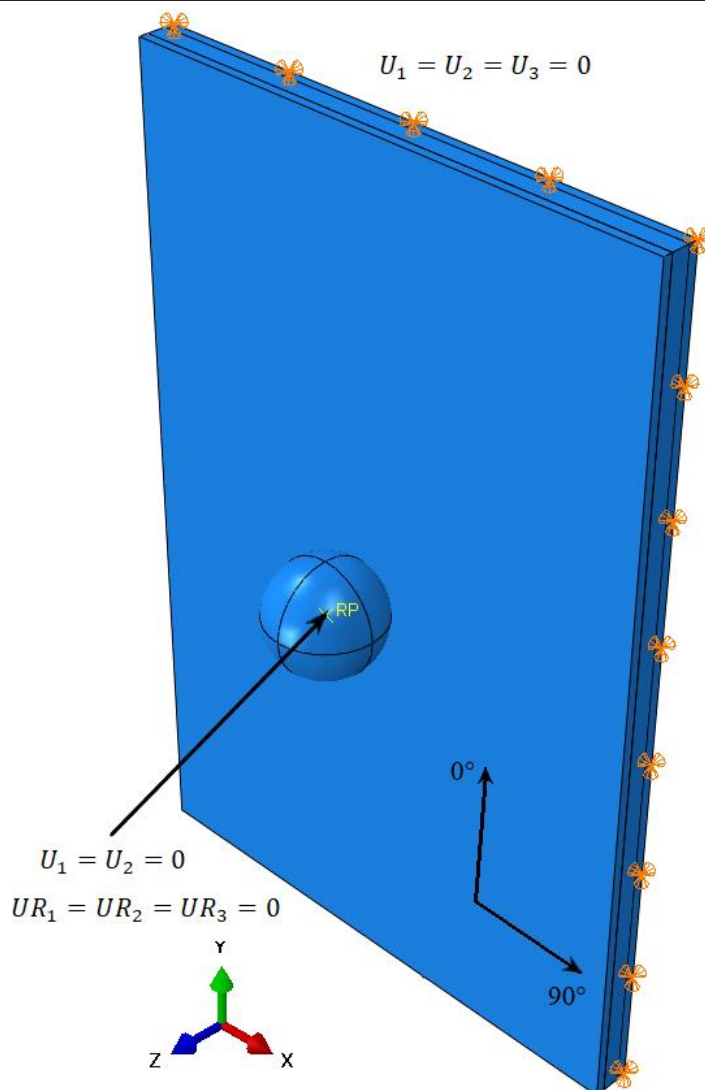
Tablica 3. Mehanička svojstva kohezivnog sloja [17]

Naziv	Oznaka	Jedinica	Vrijednost
Koeficijent krutosti u normalnom smjeru	K_{nn}	[GPa]	12,13
Koeficijenti krutosti u tangencijalnim smjerovima	$K_{ss},$ K_{tt}	[GPa]	3,38
Čvrstoća u normalnom smjeru	t_n	[MPa]	45,95
Čvrstoće u tangencijalnim smjerovima	$t_s,$ t_t	[MPa]	49,51
Energija loma u smjeru I	G_{Ic}	[N/mm]	0,98
Energije loma u smjeru II i III	$G_{IIc},$ G_{IIIc}	[N/mm]	3,71
BK parametar materijala	η	[-]	1,4

Nakon što su definirana svojstva interakcije potrebno ih je dodijeliti prikladnim površinama korištenjem opcije *Create interaction > General contact (Explicit)*. Unutar skočnog prozora pod kategorijom *Contact properties* i pritiskom na *Individual property assignments* otvara se prozor u kojem se parovima prethodno definiranih površina dodjeljuju objašnjena svojstva interakcije.

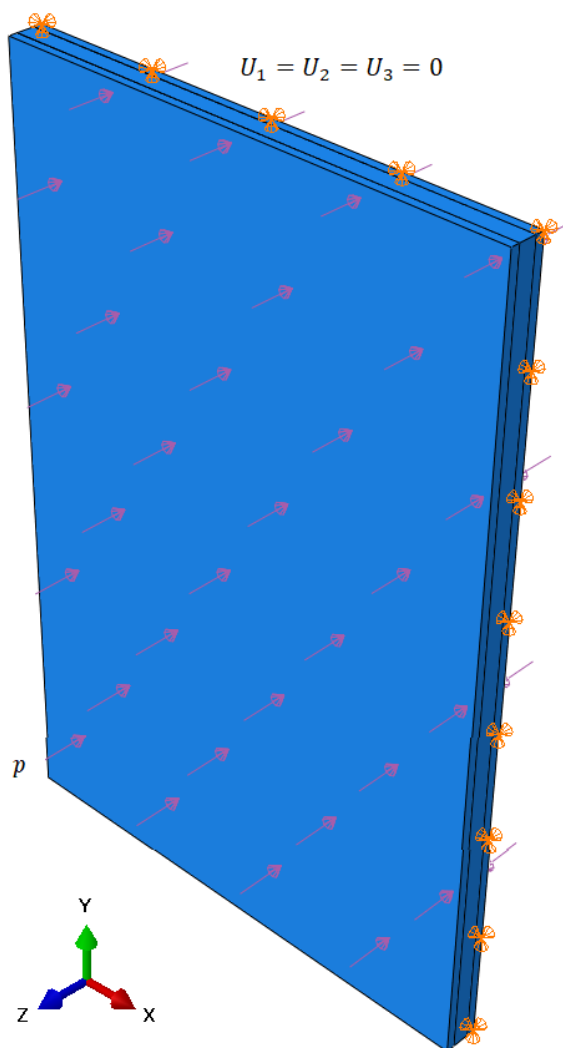
5.2.5. Modul Load

U modulu *Load* pomoću opcije *Create predefined field* otvara se skočni prozor unutar kojeg se za početni korak (*Step > Initial*) odabirom *Mechanical > Velocity* definira početna brzina udarača (4,25 m/s) u smjeru okomitom na ravninu laminata. Rubne uvjete laminata potrebno je postaviti za svaki od tri koraka simulacije. Slika 20. prikazuje rubne uvjete za prvi korak simulacije (udar pri malim brzinama), svim rubovima donjeg sloja laminata onemogućena su samo translacijska gibanja, kako bi gornji slojevi mogli međusobno „klizati“ tijekom udara. Udaraču je u referentnoj točki omogućena samo translacija u smjeru brzine, tj. u smjeru globalne osi Z (Slika 20.). Ovako postavljeni rubni uvjeti nisu posve isti kao oni iz eksperimentalnog ispitivanja, no odabrani su zato što pružaju vrlo dobre rezultate uz znatnu uštedu procesorskog vremena potrebnog za izvršenje analize.



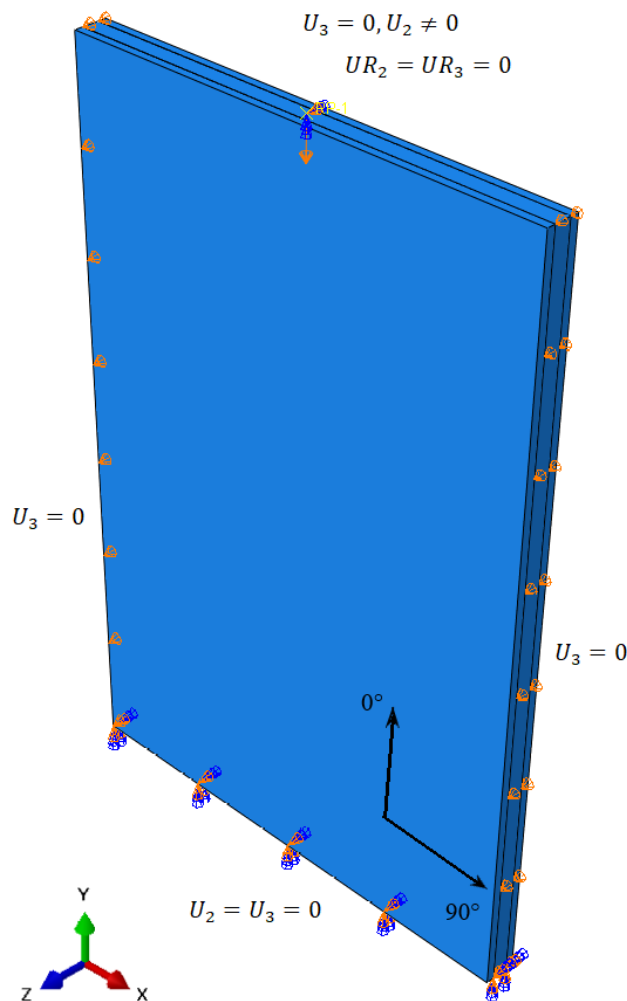
Slika 20. Rubni uvjeti u prvom koraku simulacije

Drugi korak simulacije zadržava iste rubne uvjete na rubovima laminata, ali je još potrebno postaviti tlak na vanjske površine laminata u svrhu stabilizacije modela, odnosno otklanjanja preostalih vibracija nakon udara. Za ovu svrhu, prema [17], najbolje je koristiti opciju *Create load > Mechanical > Pressure* te se unutar skočnog prozora *Edit load* pod kategorijom *Distribution* odabire ponuđena podopcija *Viscous*. Iznos opterećenja odabran je iterativnim postupkom tako što se vrijednost tlaka postepeno mijenjala dok se kinetička energija modela nije spustila približno na nulu. Konačna, odabrana vrijednost viskoznog tlaka iznosi 100 Pa. Slika 21. prikazuje rubne uvjete u drugom koraku simulacije.



Slika 21. Rubni uvjeti u drugom koraku simulacije

Za treći korak simulacije (tlačno ispitivanje nakon udara) koriste se novi rubni uvjeti koji su također pretpostavljeni u odnosu na eksperimentalne rubne uvjete u svrhu pojednostavljenja numeričkog modela i skraćivanja procesorskog vremena potrebnog za izvršenje analize. Slika 22. prikazuje rubne uvjete u trećem koraku simulacije, donjoj stranici laminata onemogućeni su svi stupnjevi slobode osim pomaka i rotacije u smjeru globalne osi X prema slici kako bi se omogućilo širenje materijala prilikom tlačenja. Bočnim stranicama laminata onemogućeni su pomaci u smjeru globalne osi Z prema slici, dok su na gornjoj stranici onemogućene rotacije (oko Z i Y) i translacija u smjeru osi Z . Pomak u smjeru osi Y prema slici povećava se vrlo „fino“ počevši od 0 s brzinom promjene pomaka od 165 mm/s, a odabrana je prema [17] za isti problem. Definirana brzina opterećivanja znatno se razlikuje od one u stvarnom eksperimentu (0,5 mm/s), no prema uputama programskog paketa [26] to neznatno utječe na rezultate dok god je promjena kinetičke energije u odnosu na unutarnju energiju manja od 10 %, što je zadovoljeno.

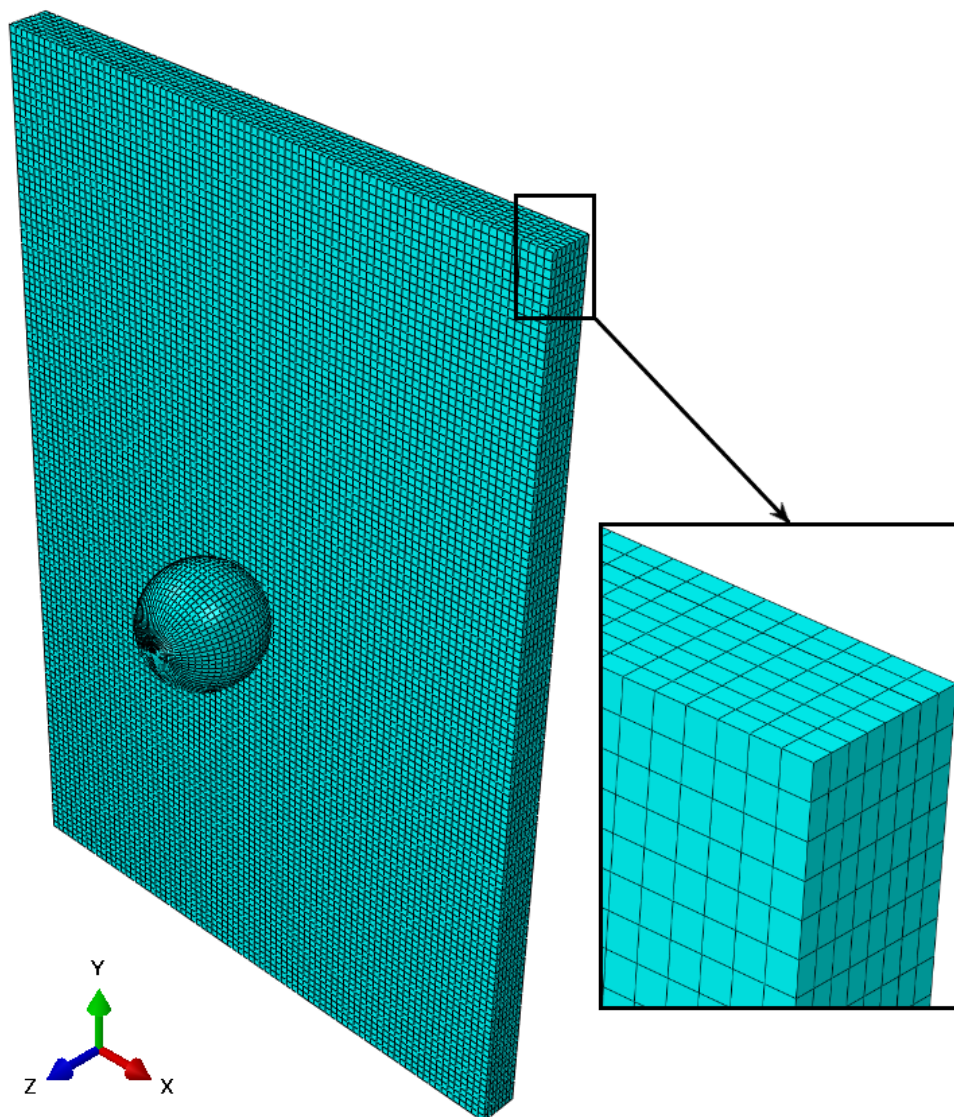


Slika 22. Rubni uvjeti trećeg koraka simulacije

Navedeni rubni uvjeti za tri koraka simulacije vrijede za svaki raspored slojeva.

5.2.6. Modul Mesh

Unutar modula *Mesh* korištenjem opcije *Seed part instance* odabrane su dimenzije elemenata u ravnini od 1,25 mm. Korištenjem opcije *Assign mesh controls* odabrani su samo pravokutni elementi s algoritmom generiranja mreže *Structured*. Svaki sloj diskretiziran je s trodimenzionalnim kontinuumskim ljuskastim konačnim elementima SC8R i to s jednim elementom po debljini sloja. Kako se radi o elementima s reduciranom integracijom preporučljivo je prema literaturi [2], [3] i [17], koristiti opciju za kontrolu efekta „pješčanog sata“ (eng. *Hourglass effect*) koja je karakteristična za elemente s reduciranom integracijom [26]. Odabrana je opcija *Enhanced hourglass control*, a ostale postavke nisu mijenjane. Udarac je diskretiziran s *Discrete rigid* konačnim elementima prvog reda, prosječne veličine 1 mm. Slika 23. prikazuje diskretizirani model, a mreža konačnih elemenata prema slici ista je za svaki raspored slojeva i sadrži 76800 konačnih elemenata po laminatu te 2048 po udarcu.



Slika 23. Diskretizirani model za slučaj korištenja kohezivnih površina

5.2.7. Modul Job

Zadnji po redu je modul *Job*, ovdje je potrebno nakon odabira opcije *Create job*, u skočnom definirati postavke simulacije. Pod kategorijom *Precision* odabrana je podopcija *Abaqus/Explicit Precision > Double-analysis only* kako bi se smanjila greška prilikom zaokruživanja rezultata. Ostale postavke nisu mijenjane, a rezultati simulacija prezentirani su u poglavlju 6.

5.3. Definiranje numeričkog modela korištenjem kohezivnih elemenata za modeliranje kohezivne zone

Ovaj model definiran je slično kao i prethodno objašnjen model, pa će stoga biti navedene samo njihove razlike po pojedinim modulima – ako postoje. Prva razlika između korištenih modela je kreiranje geometrije. Pošto se u ovom slučaju koriste kohezivni elementi s odabranom debljinom od 0,1 mm, potrebno je izraditi trodimenzionalne modele za kohezivne slojeve. Kako bi ukupna debljina laminata ostala ista (6,8 mm) za svaki raspored slojeva potrebno je korigirati debljinu pojedinačnih slojeva materijala. Ukupna debljina kohezivnih slojeva čini 2,9 % ukupne debljine laminata za raspored slojeva L1, 5,8 % za raspored slojeva L2 i 8,7 % za raspored slojeva L3. Debljina kohezivnog sloja odabrana je prema [17] jer se radi o istom materijalu i pokazuje najbolje ponašanje modela.

5.3.1. Modul Property

Materijal jednousmjerenog kompozitnog sloja definiran je na isti način kao u potpoglavlju 5.2.1, jedina razlika je što se u ovom slučaju geometriji kohezivnog sloja treba dodijeliti presjek, korištenjem opcije *Assign section*. Presjek se definira opcijom *Create section > Other > Cohesive* te je u skočnom prozoru potrebno odabrati materijal i ponašanje – *Traction separation*. Kohezivni materijal definira se preko opcije *Create material* prema podacima iz Tablica 3. na način kako je objašnjeno u potpoglavlju 5.2.4, a jedino što treba promijeniti su vrijednosti koeficijenta krutosti kohezivnog sloja. Koeficijente krutosti treba promijeniti kako bi se u obzir uzela debljina kohezivnog sloja i to na način da se podijele s debljinom sloja [26].

5.3.2. Modul Step

U modulu *Step* korištenjem opcije *Field output manager*, pod kategorijom *Failure/ Fracture* potrebno je umjesto varijabli *CSQUADSCRT* i *CSDMG* odabrati varijablu *SDEG* za praćenje ukupnog oštećenja kohezivnih elemenata, a sve ostalo ostaje isto.

5.3.3. Modul Interaction

Kako je u ovom slučaju kohezivno ponašanje definirano u modulu *Property*, potrebno je samo definirati svojstvo interakcije za ostvarivanje „tvrdog“ kontakta s trenjem između udarača i ploče te između slojeva. Svojstvo interakcije dodjeljuje se cijelom modelu pomoću opcije *Create interaction > General contact (Explicit)*. Nadalje, uz definiranje ograničenja krutog tijela (udarača), potrebno je još povezati kohezivne slojeve sa susjednim GFRP slojevima korištenjem *Tie* ograničenja s metodom diskretizacije *Surface to surface*. Pri definiranju

površina za *Tie* ograničenje bitno je da glavna (eng. *Master surface*) površina bude ona smještena na GFRP sloju, a podređena površina (eng. *Slave surface*) ona na kohezivnom sloju.

5.3.4. Modul Load

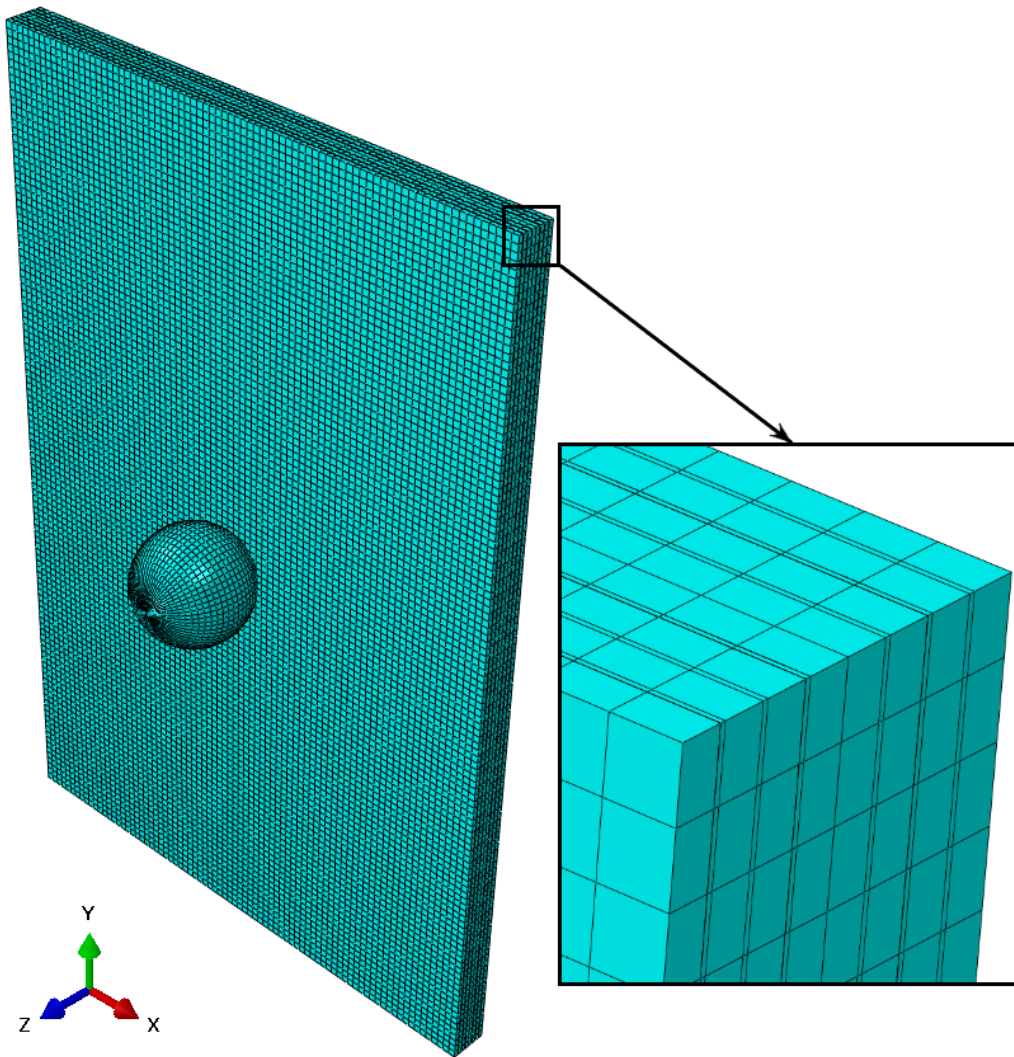
Rubni uvjeti za sva tri koraka isti su kao oni prikazani na Slika 20., Slika 21. i Slika 22., pri čemu je kod rubnih uvjeta za treći korak potrebno iste postaviti i na stranice kohezivnih slojeva. Vrijednost viskoznog tlaka u koraku stabilizacije ostaje ista, kao i brzina pomaka prilikom trećeg koraka, tj. prilikom tlačnog ispitivanja.

5.3.5. Modul Mesh

Jednosumjereni slojevi laminata diskretiziraju se trodimenzionalnim heksaedarskim ljuskastim SC8R elementima s dimenzijama u ravnini laminata od 1,25 mm kao i u modelu s kohezivnim površinama, što znači da su slojevi diskretizirani s istim brojem elemenata. Udarac je također diskretiziran na isti način kao u potpoglavlju 5.2.6.

Kohezivni slojevi diskretizirani su s pravokutnim COH3D8 kohezivnim elementima, a algoritam za generiranje mreže odabran je kao *Structured*. Odabrana je veličina elemenata u ravnini od 1,25 mm kako bi se čvorovi elemenata u diskretiziranom kohezivnom sloju poklapali s položajem čvorova susjednih GFRP slojeva. Odabrana veličina kohezivnih elemenata ne mora nužno biti ista kao i ona kod SC8R elemenata kojima su diskretizirani slojevi laminata jer je korišteno *Tie* ograničenje za povezivanje međufaznog područja sa susjednim slojevima, ali u ovom slučaju bi smanjenje njihove veličine rezultiralo s prevelikim brojem elemenata s obzirom na procesorsku snagu korištenog računala.

Ukupan broj konačnih elemenata s kojima je diskretiziran model razlikuje se ovisno o rasporedu slojeva, pa je tako za raspored slojeva L1 generirano 96000 elemenata, za raspored slojeva L2 115200 elemenata i za raspored slojeva L3 134400 elemenata po laminatu, a udarac je diskretiziran s 2048 elemenata za sva tri slučaja. Slika 24. prikazuje diskretizirani model za slučaj korištenja kohezivnih elemenata i to za raspored slojeva L3.



Slika 24. Diskretizirani model za slučaj korištenja kohezivnih elemenata

6. REZULTATI

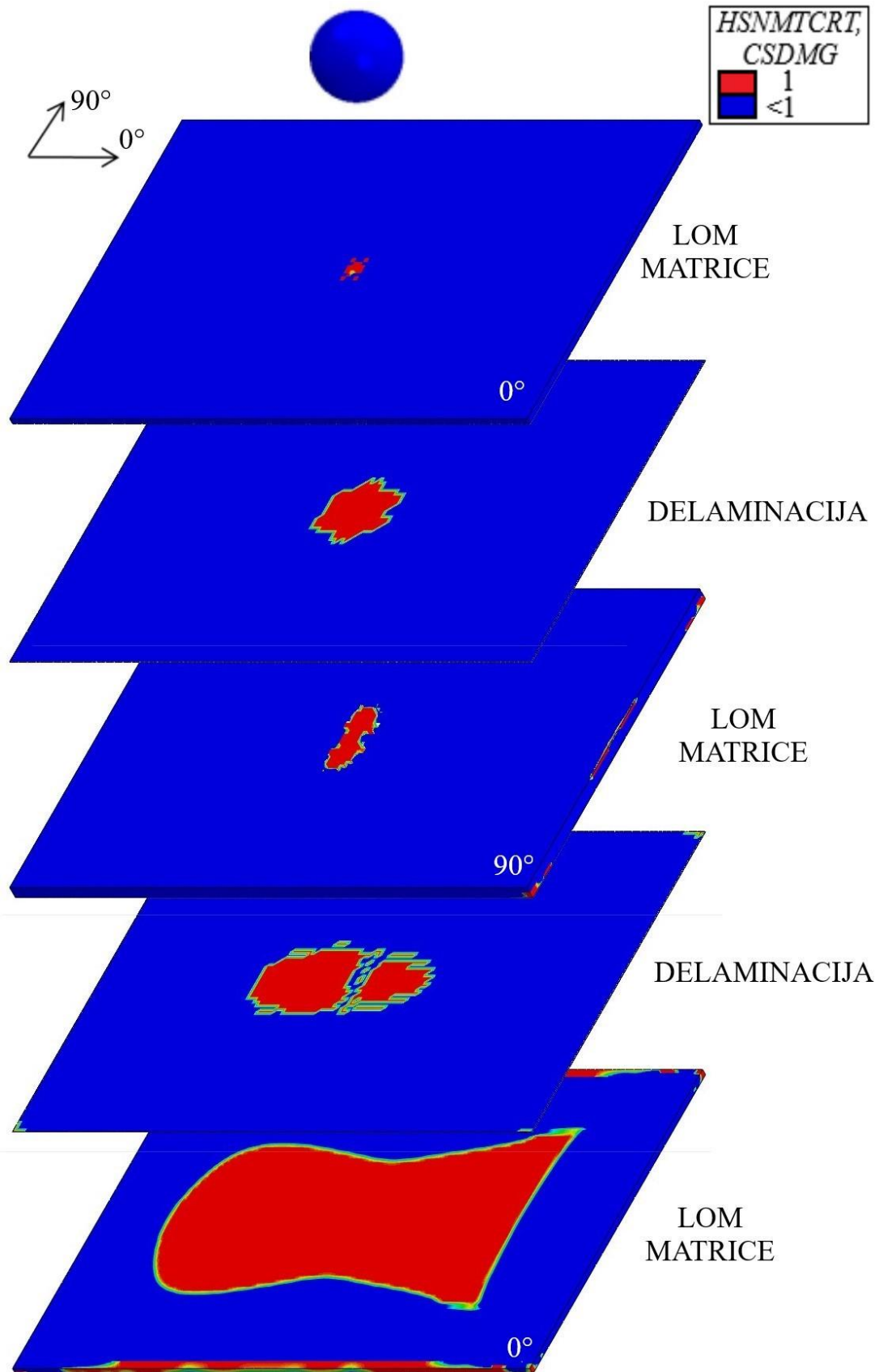
Numeričke analize provedene su na osobnom računalu, a simulacije su trajale između 4 do 10 sati ovisno o korištenom modelu međuslojnog područja i broju konačnih elemenata. Nadalje, za zapisivanje rezultata odabranih varijabli bilo je potrebno između 6 do 8 GB računalne memorije. Iz prethodno navedenih činjenica vidljivo je da je ovakva vrsta složene simulacije vrlo „skupa“, odnosno računalno zahtjevna, a uzrok je vrlo mali stabilni vremenski inkrement. U nastavku su izloženi rezultati analize udara pri malim brzinama i tlačnog ispitivanja nakon udara.

6.1. Rezultati udara pri malim brzinama

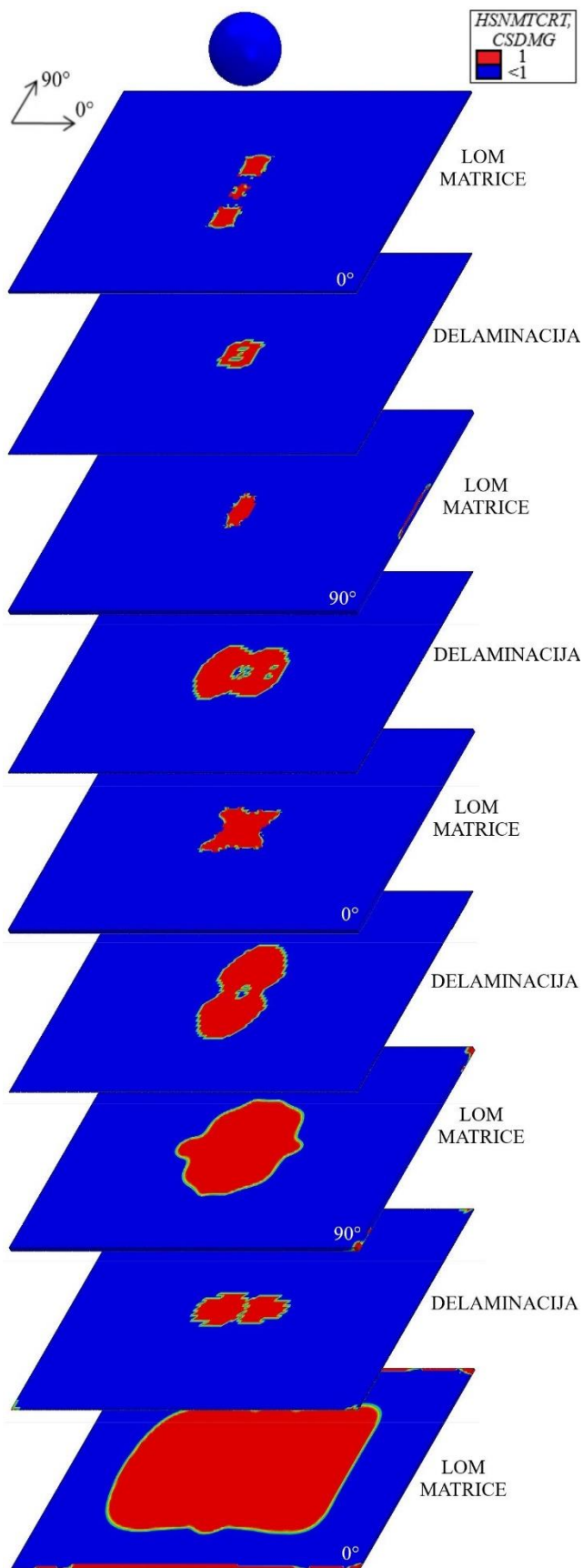
Slika 25. prikazuje aksonometrijski prikaz laminata za raspored slojeva L1 i slučaj korištenja kohezivnih površina (oznaka KP u opisu slike). Na slici su prikazana dominantna, inicijalna vlačna oštećenja matrice prema *HSNMTCRT* varijabli i oštećenja kohezivnog područja (delaminacije) po *CSDMG* varijabli. Crvenom bojom obojeni su elementi, odnosno područja (za kohezivne površine) na kojima su vrijednosti navedenih varijabli 1, što znači da je došlo do inicijacije oštećenja. Plavom bojom obojeni su elementi na kojima nije došlo do popuštanja odnosno inicijacije oštećenja prema Hashin-u.

Slika 26. prikazuje aksonometrijski prikaz laminata s rasporedom slojeva L2 za slučaj korištenja kohezivnih površina, na slici su prikazani rezultati *HSNMTCRT* i *CSDMG* varijabli.

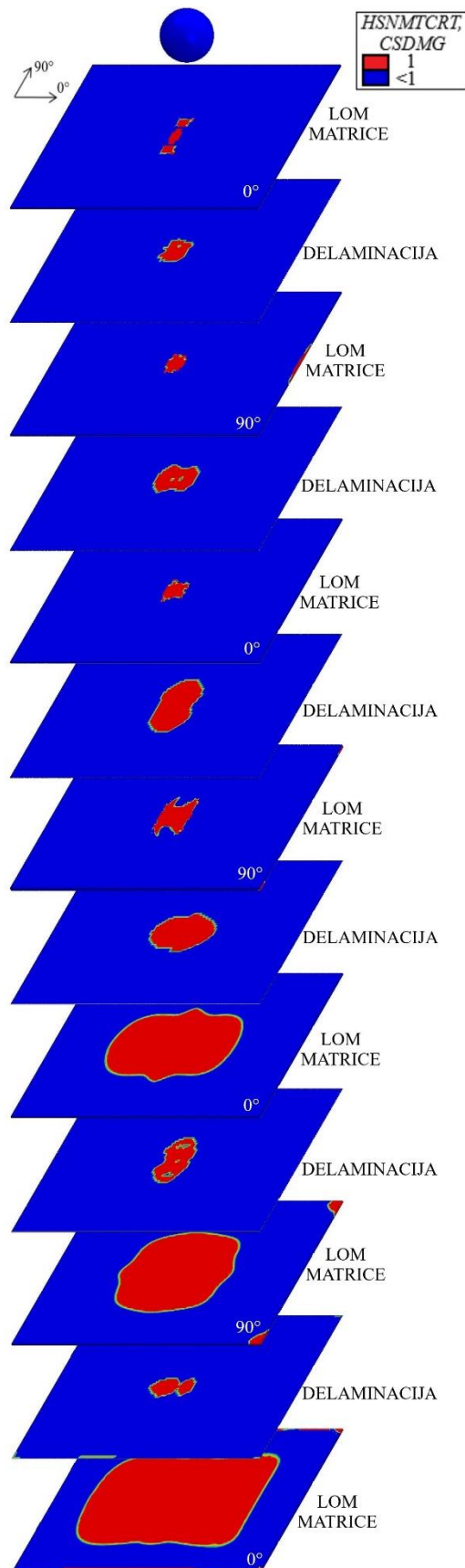
Slika 27. prikazuje aksonometrijski prikaz laminata s rasporedom slojeva L3 za slučaj korištenja kohezivnih površina, a na slici su prikazani rezultati *HSNMTCRT* i *CSDMG* varijabli. Vidljivo je da se vlačna oštećenja matrice za sva tri rasporeda slojeva poklapaju s pretpostavkom iz potpoglavlja 4.1, kako su najveća vlačna oštećenja matrice na donjim slojevima laminata (Slika 8.).



Slika 25. Aksonometrijski prikaz oštećenja matrice (*HSNMTCRT*) i delaminacija za laminat L1 – KP

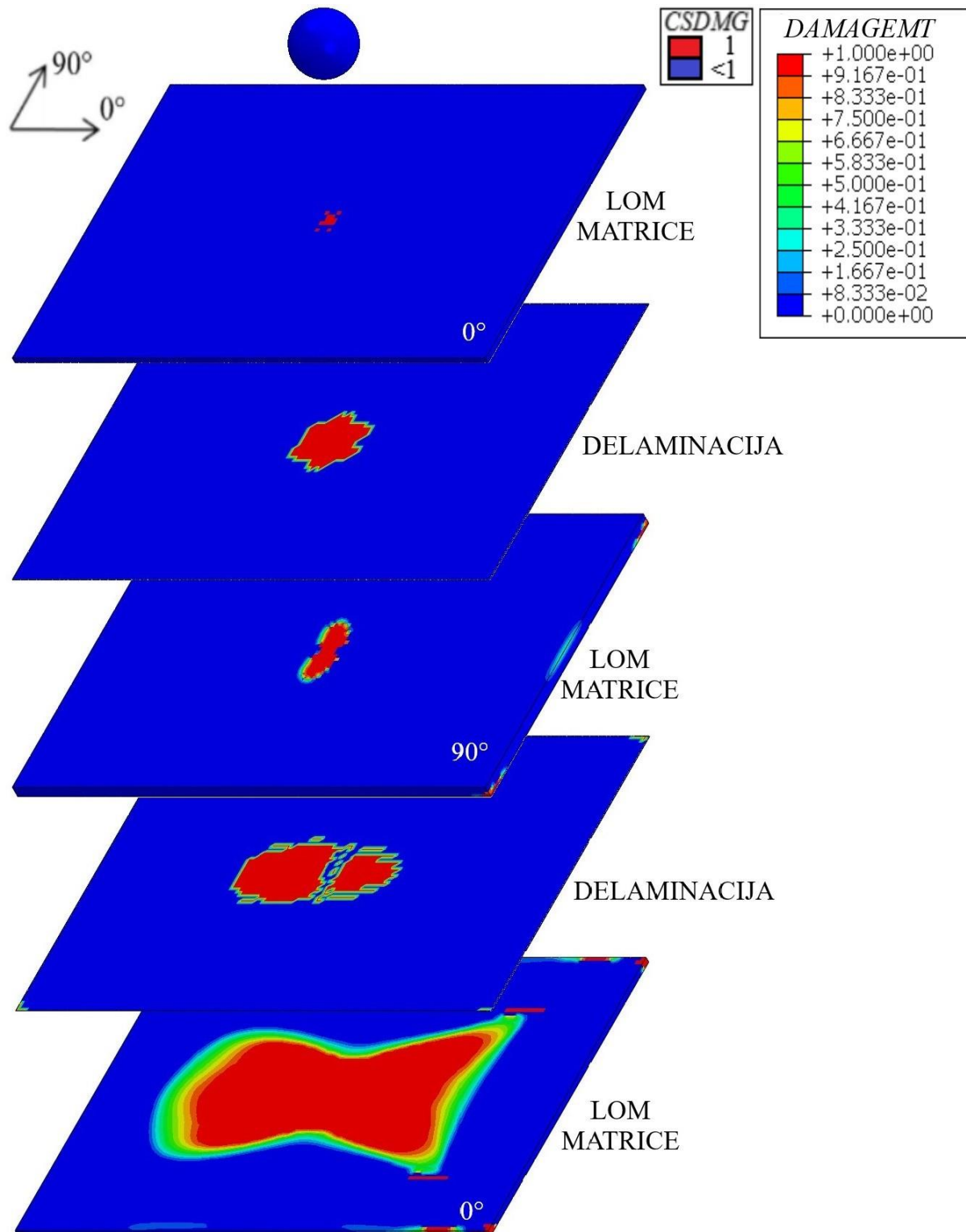


Slika 26. Aksonometrijski prikaz oštećenja matrice (*HSNMTCRT*) i delaminacija za laminat L2 - KP

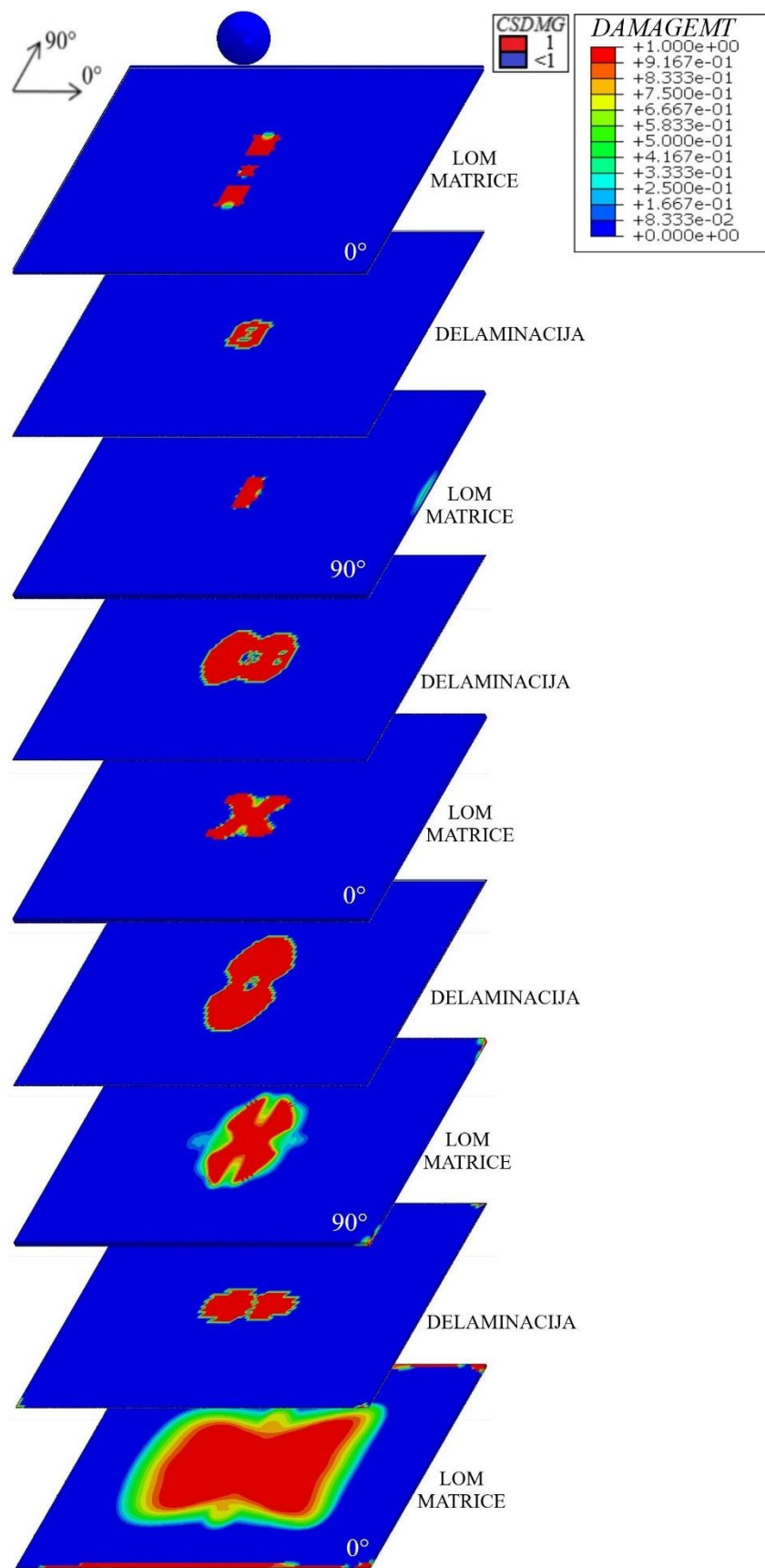


Slika 27. Aksonometrijski prikaz oštećenja matrice ($HSNMTCRT$) i delaminacija za laminat L3 - KP

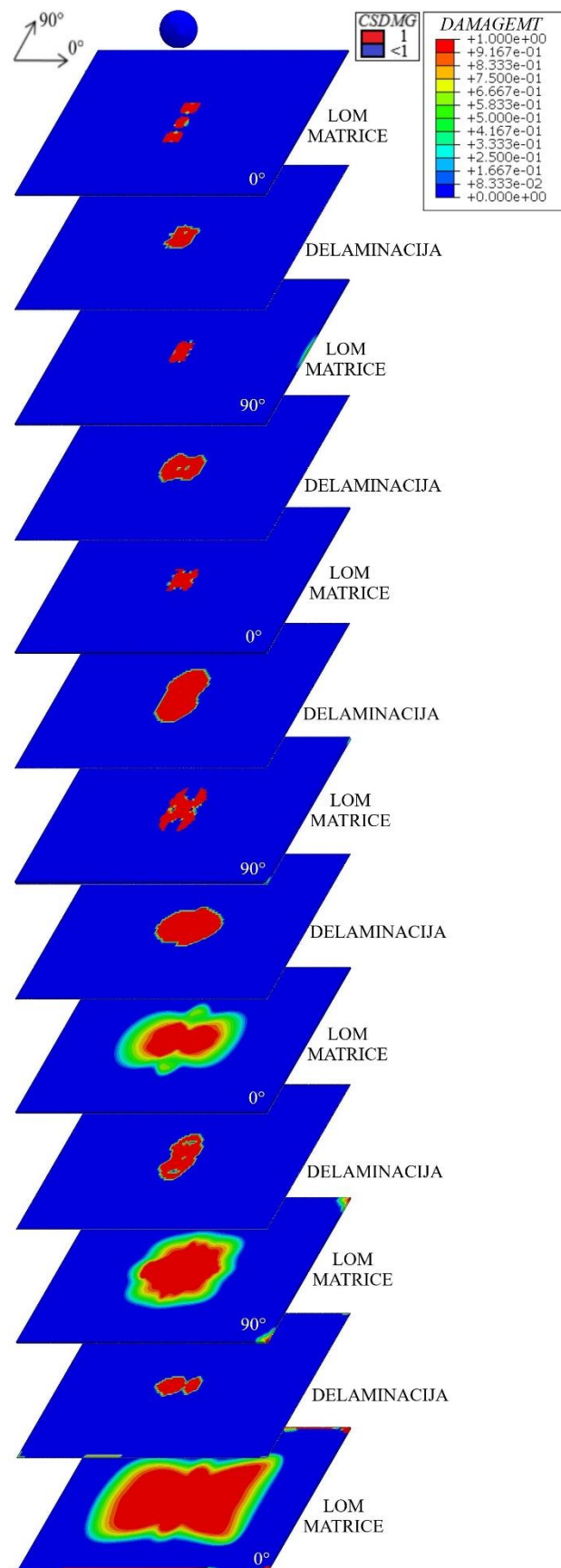
Slika 28., Slika 29. i Slika 30. prikazuju aksonometrijski prikaz laminata s vrijednostima varijable *DAMAGEMT* i *CSDMG* za rasporede slojeva redom L1, L2 i L3 u slučaju korištenja kohezivnih površina (oznaka KP u opisu slike).



Slika 28. Aksonometrijski prikaz oštećenja matrice (*DAMAGEMT*) i delaminacija za laminat L1 - KP

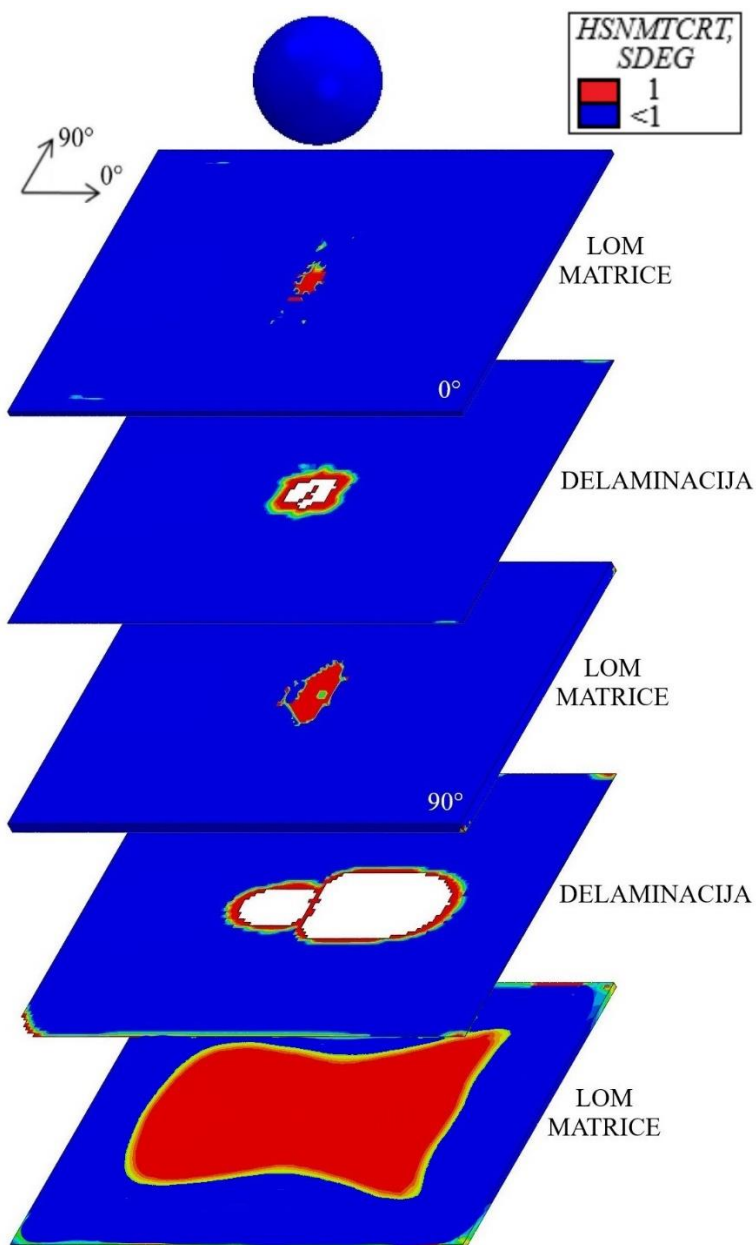


Slika 29. Aksonometrijski prikaz oštećenja matrice (*DAMAGEMT*) i delaminacija za laminat L2 - KP



Slika 30. Aksonometrijski prikaz oštećenja matrice (*DAMAGEMT*) i delaminacija za laminat L3 - KP

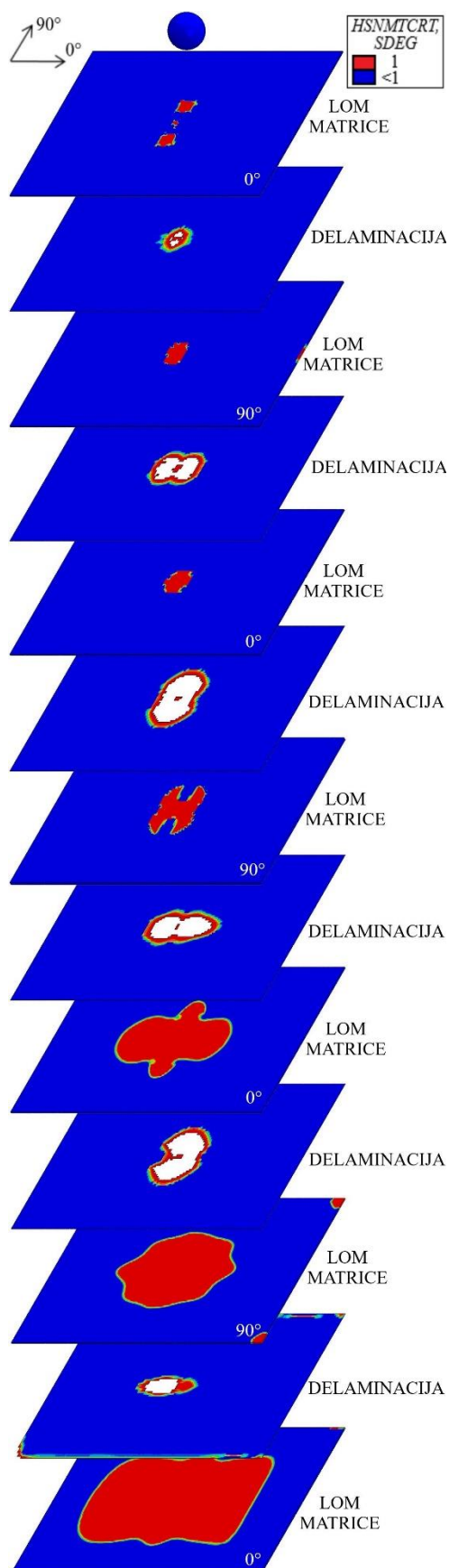
Slika 31. prikazuje aksonometrijski prikaz laminata za raspored slojeva L1 i korištenje kohezivnih elemenata (oznaka KE u opisu slike). Na slici su prikazana dominantna, vlačna oštećenja matrice prema *HSNMTCRT* varijabli i oštećenja kohezivnih elemenata (delaminacije) po *SDEG* varijabli. Crvenom bojom obojeni su elementi na kojima su vrijednosti navedenih varijabli 1, a bijela područja kohezivnog sloja su izbrisani elementi uslijed prevelike distorzije.



Slika 31. Aksonometrijski prikaz oštećenja matrice (*HSNMTCRT*) i delaminacija za laminat L1 - KE

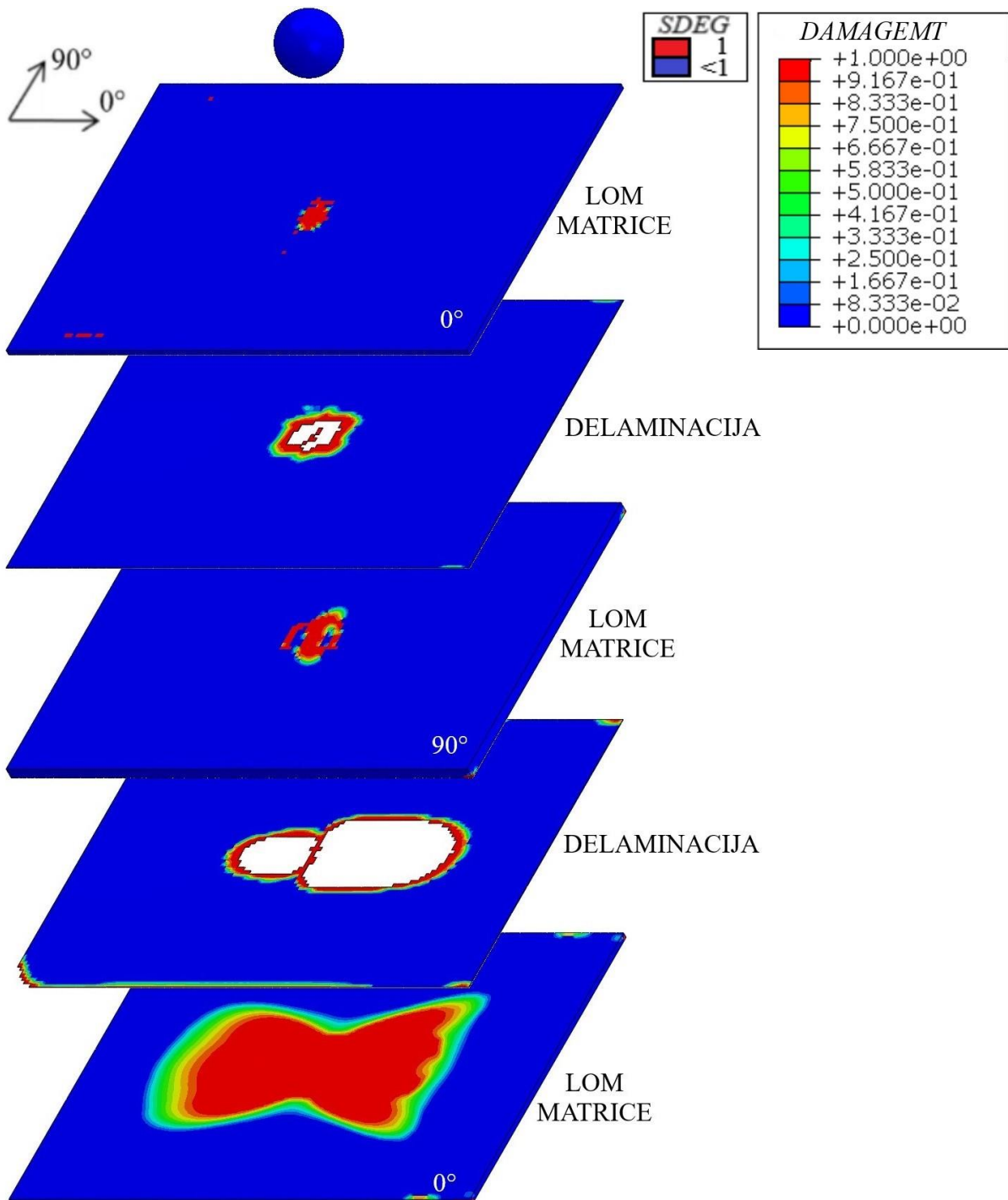
Slika 32. prikazuje aksonometrijski prikaz laminata s rasporedom slojeva L2 za slučaj korištenja kohezivnih elemenata, na slici su prikazani rezultati *HSNMTCRT* i *SDEG* varijabli.

Slika 33. prikazuje aksonometrijski prikaz laminata s rasporedom slojeva L3 za slučaj korištenja kohezivnih elemenata, a na slici su prikazani rezultati *HSNMTCRT* i *SDEG* varijabli.

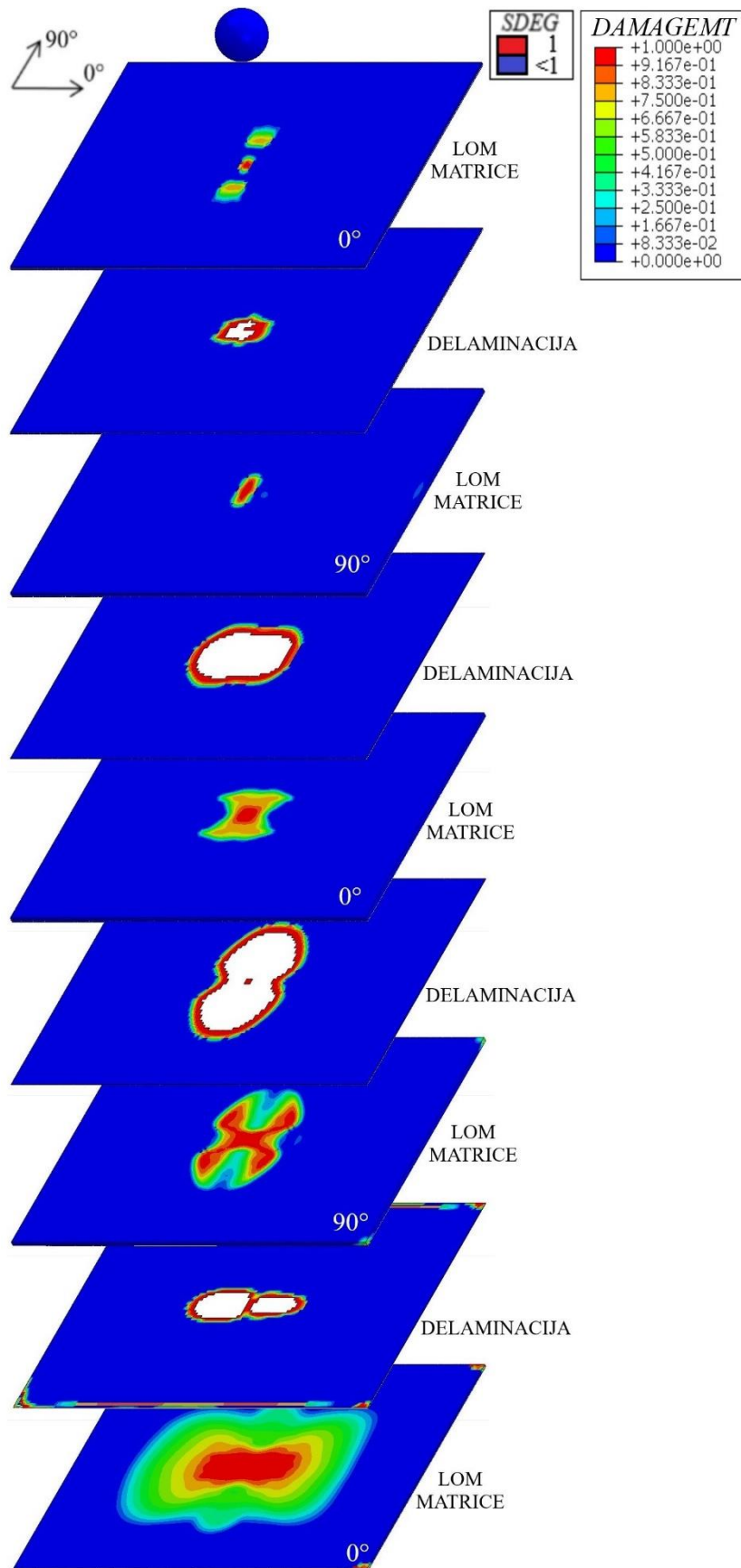


Slika 33. Aksonometrijski prikaz oštećenja matrice (*HSNMTCRT*) i delaminacija za laminat L3 – KE

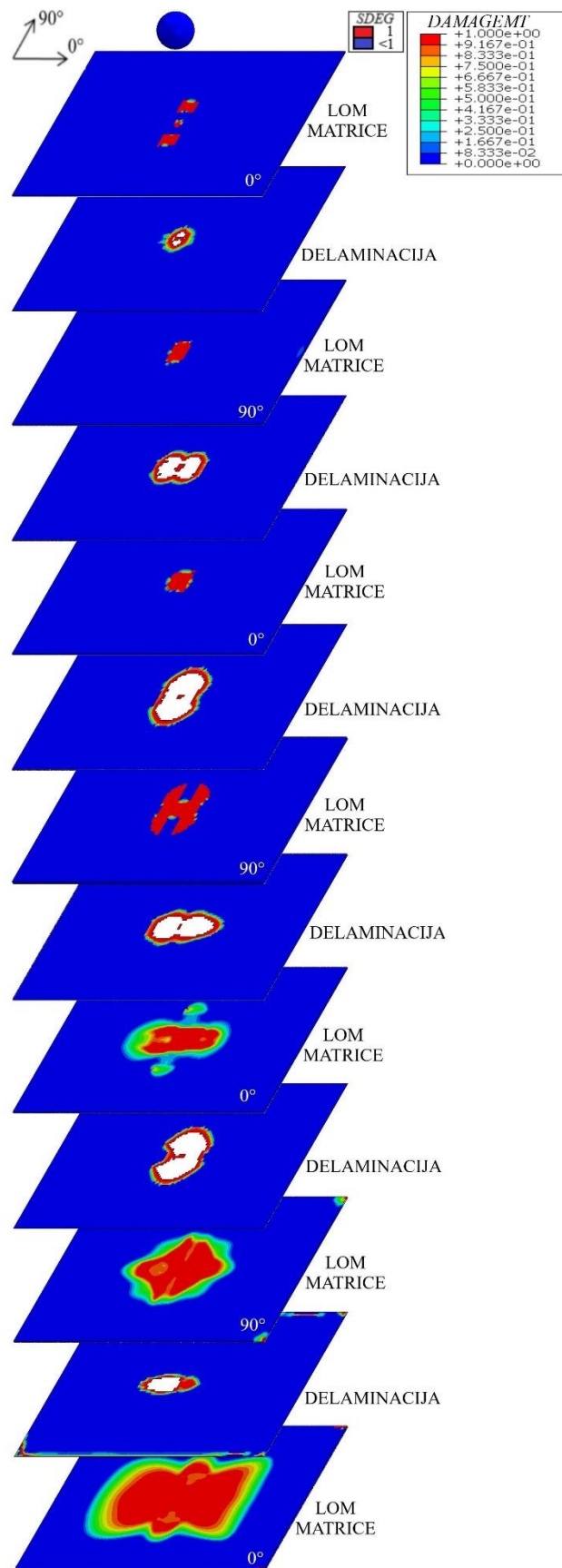
Slika 34., Slika 35. i Slika 36. prikazuju aksonometrijski prikaz laminata s vrijednostima varijable *DAMAGEMT* i *CSDMG* za rasporede slojeva redom L1, L2 i L3 u slučaju korištenja kohezivnih površina (oznaka KP u opisu slike).



Slika 34. Aksonometrijski prikaz oštećenja matrice (*DAMAGEMT*) i delaminacija za laminat L1 - KE

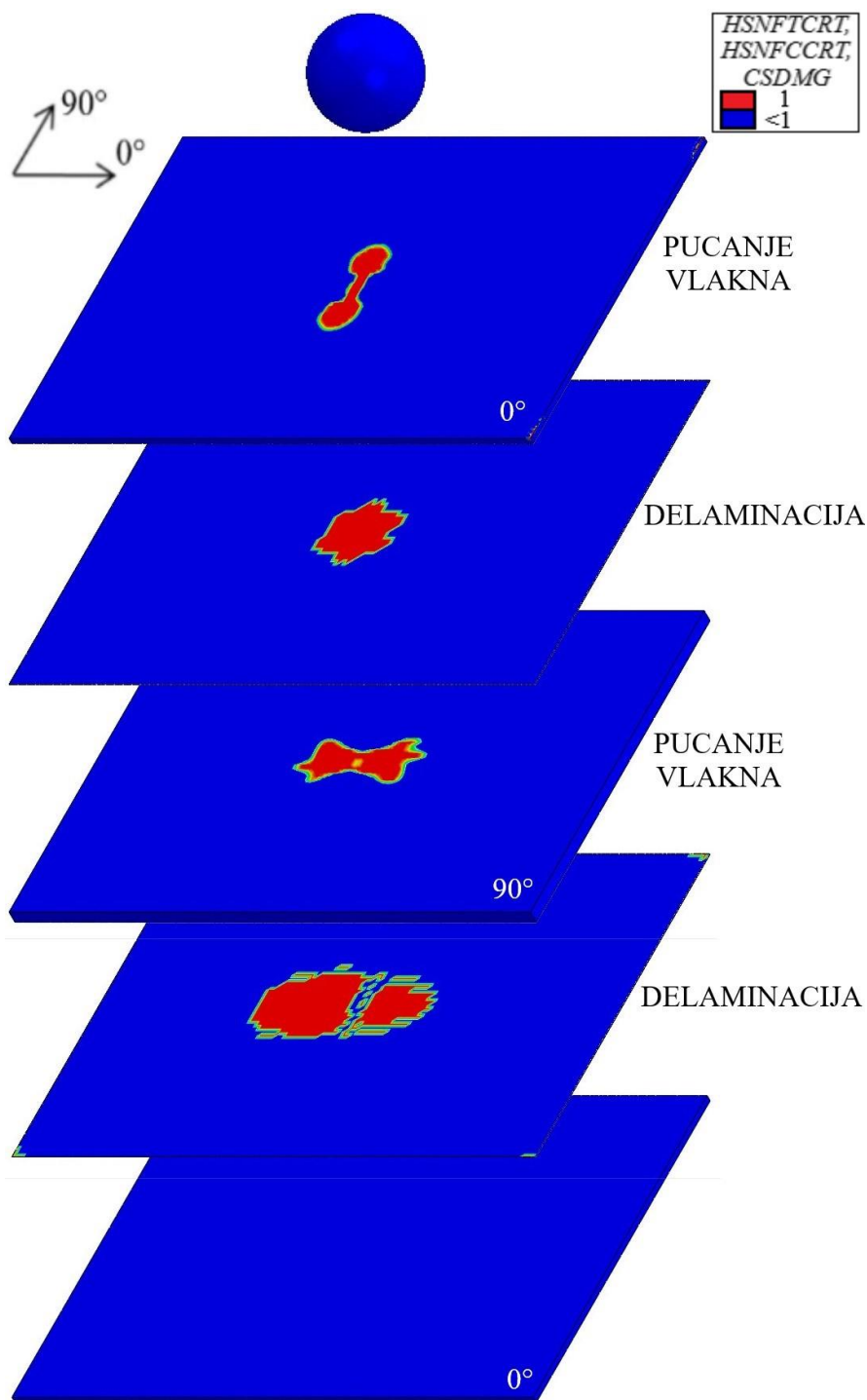


Slika 35. Aksonometrijski prikaz oštećenja matrice (*DAMAGEMT*) i delaminacija za laminat L2 - KE

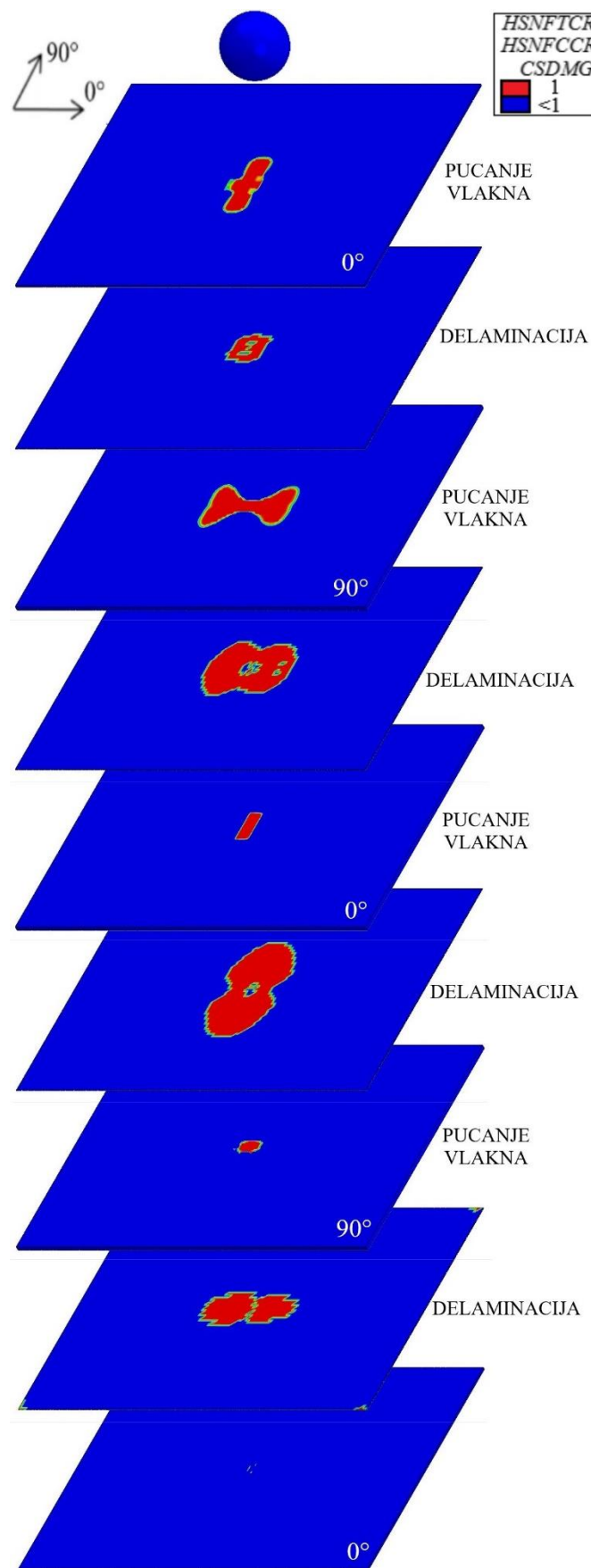


Slika 36. Aksonometrijski prikaz oštećenja matrice (*DAMAGEMT*) i delaminacija za laminat L3 - KE

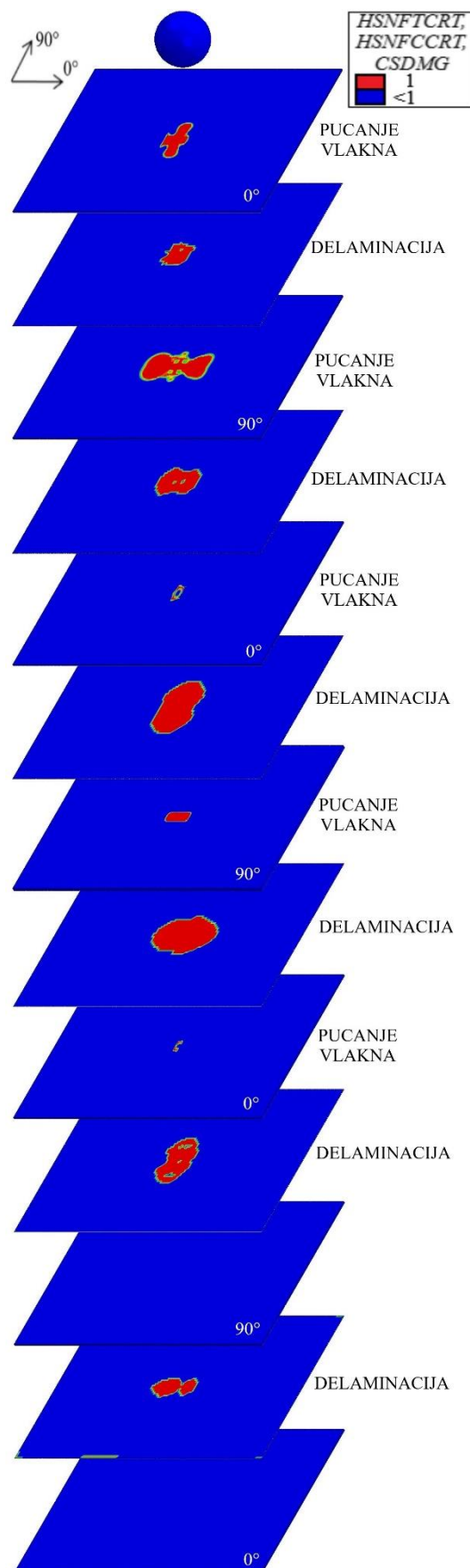
Slika 37., Slika 38. i Slika 39. prikazuju aksonometrijske prikaze laminata za raspored slojeva redom L1, L2 i L3 te slučaj korištenja kohezivnih površina (oznaka KP u opisu slike). Na slikama su prikazani rezultati *HSNFTCRT*, *HSNFCCRT* (vlačno i tlačno popuštanje vlakna) i *CSDMG* varijabli. Crvenom bojom obojeni su elementi, odnosno područja (za kohezivne površine) na kojima je nastupila inicijacija oštećenja. Iz rezultata je vidljivo kako su oštećenja vlakana prisutna u gornjim slojevima laminata te su znatno manja od oštećenja matrice.



Slika 37. Aksonometrijski prikaz oštećenja vlakna i delaminacija za laminat L1 – KP

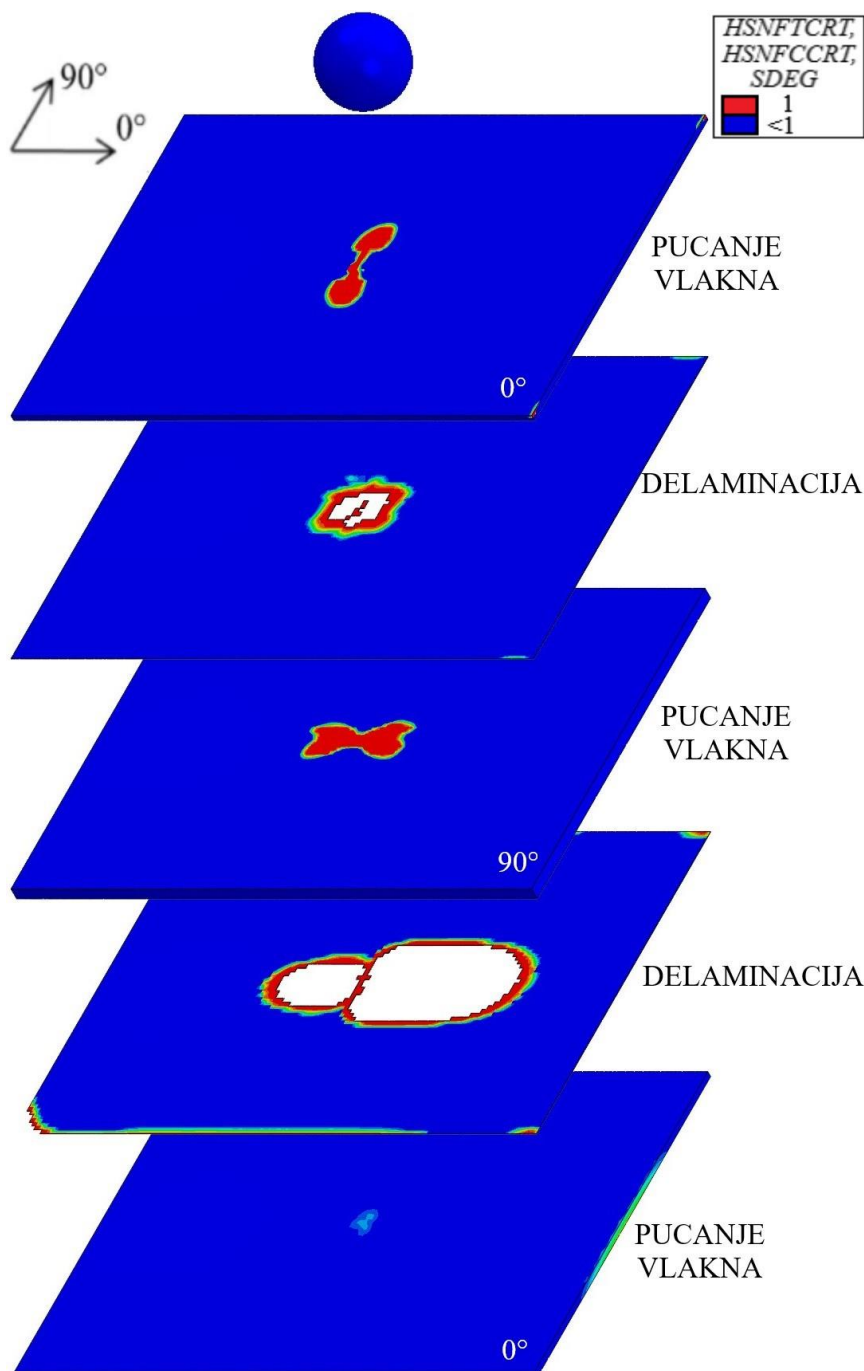


Slika 38. Aksonometrijski prikaz oštećenja vlakna i delaminacija za laminat L2 – KP

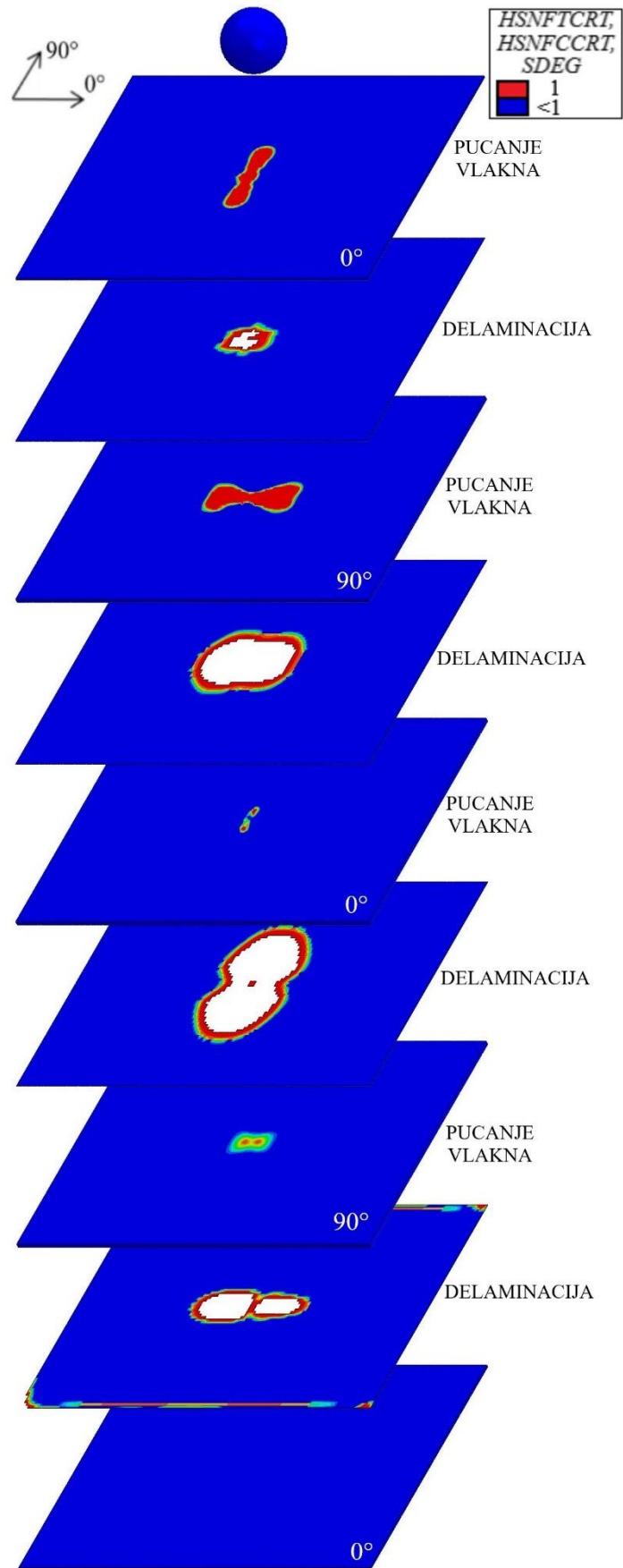


Slika 39. Aksonometrijski prikaz oštećenja vlakna i delaminacija za laminat L3 – KP

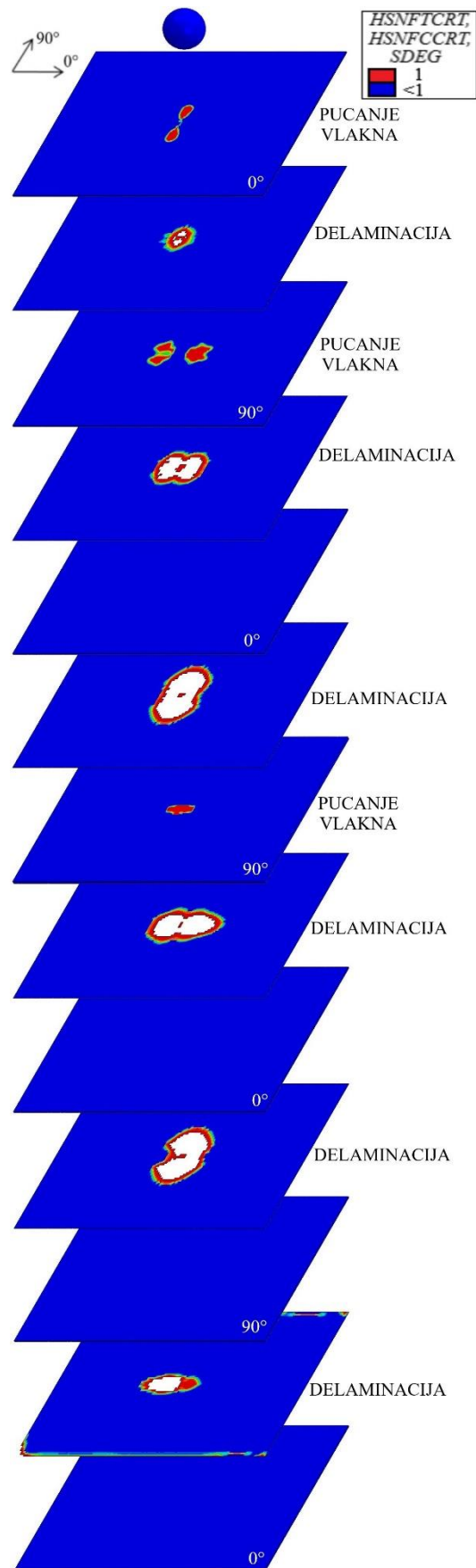
Slika 40., Slika 41. i Slika 42. prikazuju aksonometrijske prikaze laminata za raspored slojeva redom L1, L2 i L3 te slučaj korištenja kohezivnih površina (oznaka KP u opisu slike). Na slikama su prikazani rezultati *HSNFTCRT*, *HSNFCCRT* (vlačno i tlačno popuštanje vlakna) i *SDEG* varijabli. Crvenom bojom obojeni su elementi na kojima je nastupila inicijacija oštećenja, a bijelom bojom su označeni izbrisani elementi. Iz rezultata je vidljivo kako su oštećenja vlakana prisutna samo u gornjim slojevima laminata te su znatno manja naspram oštećenja matrice.



Slika 40. Aksonometrijski prikaz oštećenja vlakna i delaminacija za laminat L1 – KE



Slika 41. Aksonometrijski prikaz oštećenja vlakna i delaminacija za laminat L2 – KE



Slika 42. Aksonometrijski prikaz oštećenja vlakna i delaminacija za laminat L3 – KE

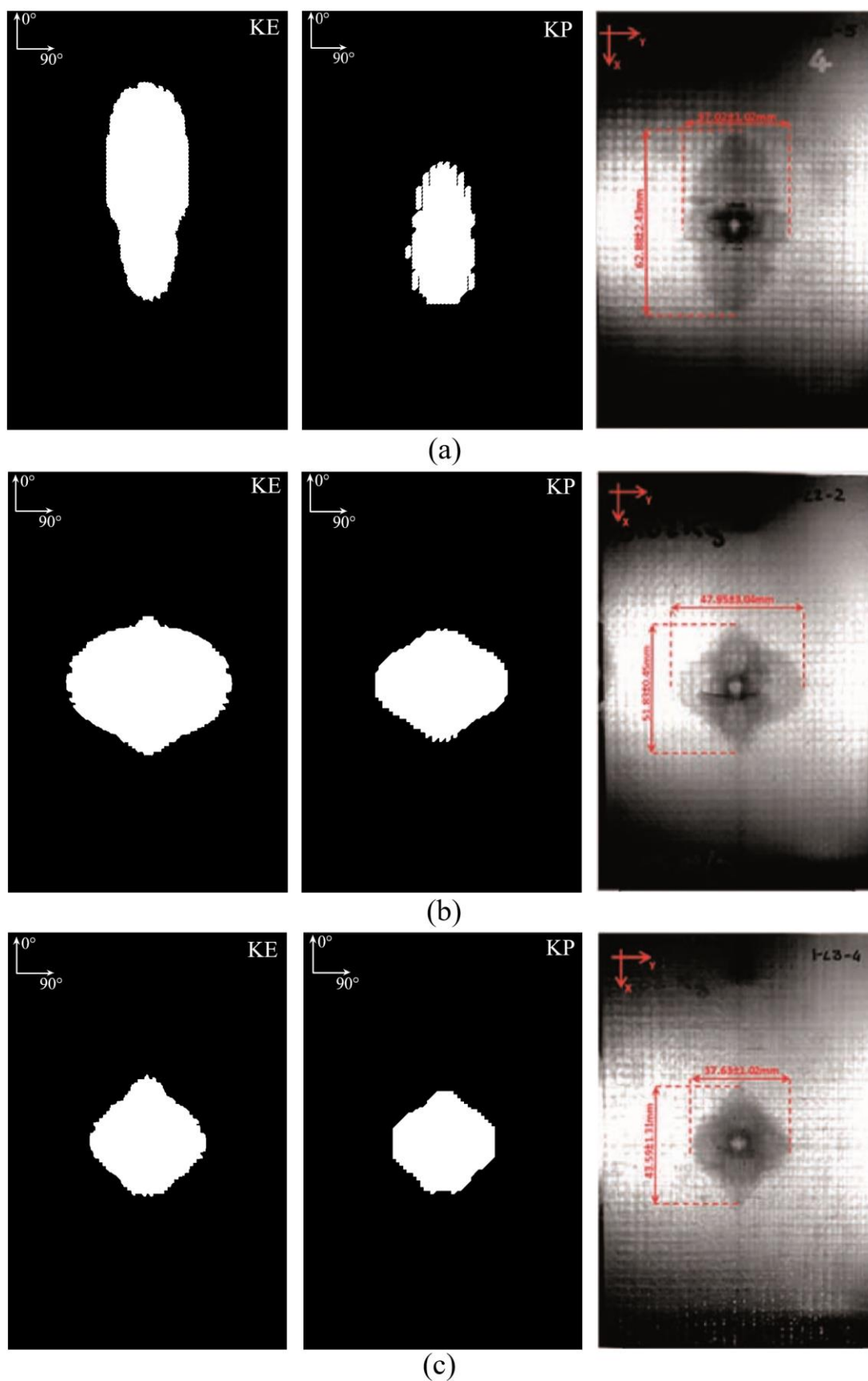
Slika 43. prikazuje ukupne delaminacije između slojeva dobivene numerički i putem eksperimentalnog ispitivanja korištenjem metode *back – light tehniqe* [22], za sva tri rasporeda slojeva redom L1 (a), L2 (b) i L3 (c). Oznaka KE na slici 43. odnosi se na delaminacije dobivene korištenjem kohezivnih elemenata, dok se oznaka KP odnosi na korištenje svojstva kohezivnih površina. Prikazi numeričkih ukupnih delaminacija dobiveni su korištenjem računalnog programa *Adobe Photoshop* za obradu slika. Vidljivo je odlično poklapanje oblika delaminacija za sva tri rasporeda slojeva za obje korištene metode modeliranja kohezivne zone. Važno je napomenuti kako se površina delaminacija ne može usporediti prema slici jer su numerički i eksperimentalni prikazi u različitom mjerilu.

Tablica 4. daje usporedbu ukupne površine delaminacija za obje korištene numeričke metode – korištenjem kohezivnih površina i kohezivnih elemenata, s eksperimentalno dobivenim podacima [22]. Vidljivo je da obje numeričke metode vrlo loše pretpostavljaju površinu delaminacija za prvi raspored slojeva (L1). Promatrajući podatke za drugi raspored slojeva vidljivo je da je površina delaminacija odlično pretpostavljena korištenjem kohezivnih elemenata za razliku od kohezivnih površina. Konačno, za treći raspored slojeva (L3) kohezivni elementi daju zadovoljavajuće poklapanje rezultata, dok je greška korištenjem kohezivnih površina opet značajna. Promatranjem eksperimentalnih rezultata može se zaključiti kako je površina delaminacija najveća za najmanji broj međufaznih područja (eng. *Interface*), dok je površina delaminacija najmanja za raspored slojeva s najviše međufaznih područja. Razlog tome je uravnoteženija raspodjela oštećenja zbog većeg broja međufaznih područja. Greška je izračunata prema izrazu (14), gdje se A_{Ei} odnosi na eksperimentalne rezultate, A_{Li} na numeričke, a $i = 1,2,3$ označava raspored slojeva.

$$greška = \left(1 - \frac{A_{Ei}}{A_{Li}}\right) \cdot 100 \%, \quad (14)$$

Tablica 4. Usporedba ukupnih površina delaminacija dobivenih numerički i eksperimentalno za sva tri rasporeda slojeva

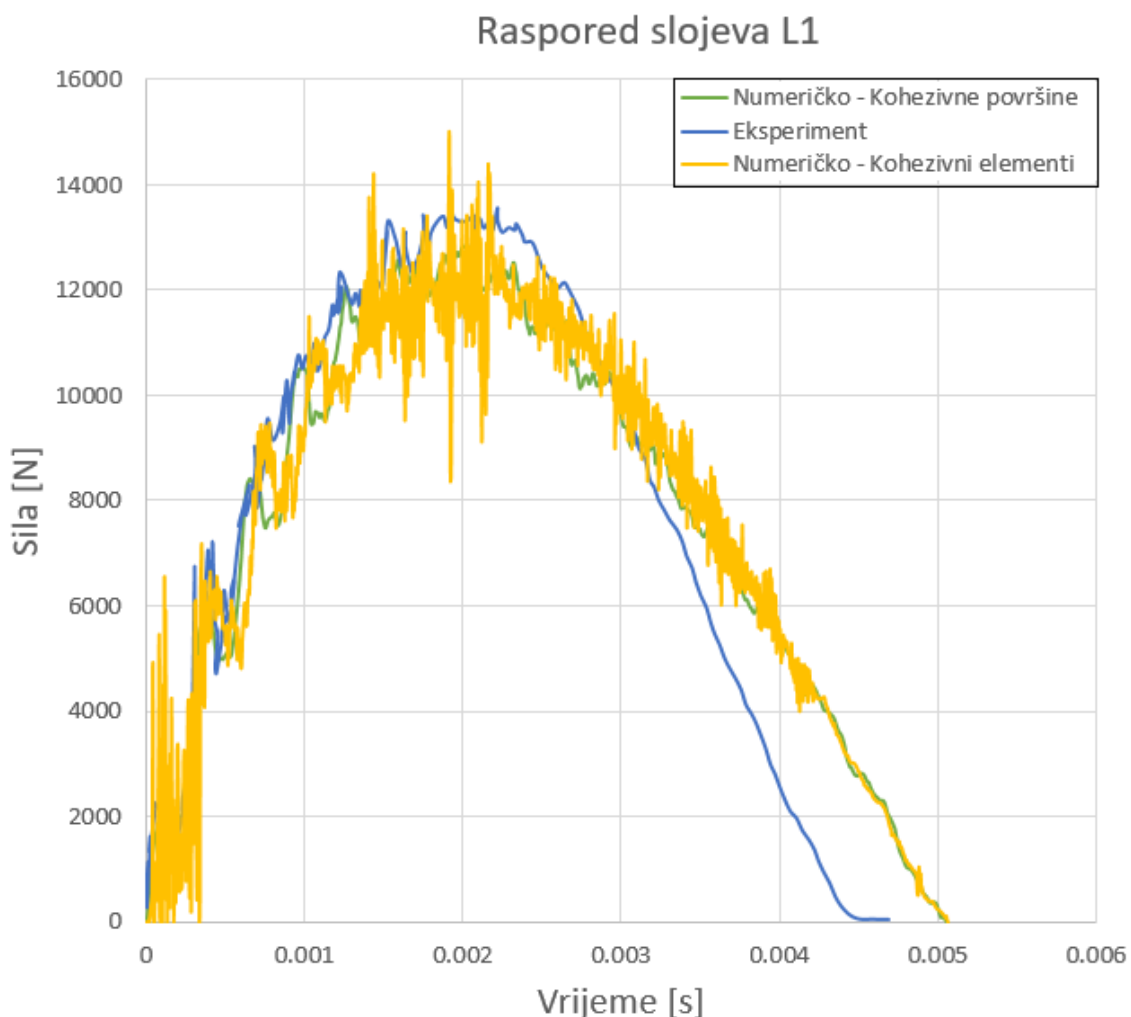
Raspored slojeva	Kohezivne površine		Kohezivni elementi		Eksperiment
	Površina [mm ²]	Greška [%]	Površina [mm ²]	Greška [%]	Površina [mm ²]
L1	1227,1	-103,73	1601,7	-56,08	2500
L2	1404,39	-35,89	1994,28	4,3	1908,5
L3	974	-33,09	1156,98	-12,04	1296,3



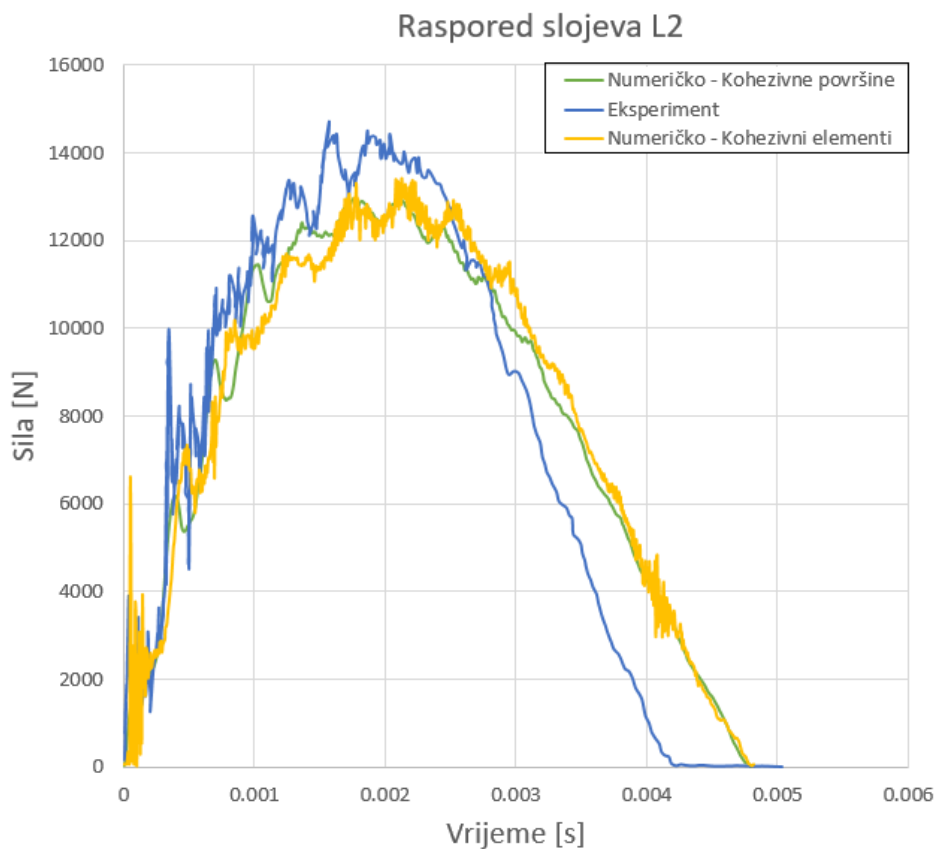
Slika 43. Usporedba numerički i eksperimentalno dobivene površine ukupnih delaminacija laminata; (a) raspored slojeva L1, (b) raspored slojeva L2, (c) raspored slojeva L3

Nakon što su prezentirana vizualna oštećenja laminata u obliku loma matrice i delaminacija u nastavku su prikazane promjene reakcijske sile ovisno o vremenu, pomaku udarača i rasporedu slojeva u usporedbi s eksperimentalnim podacima [22].

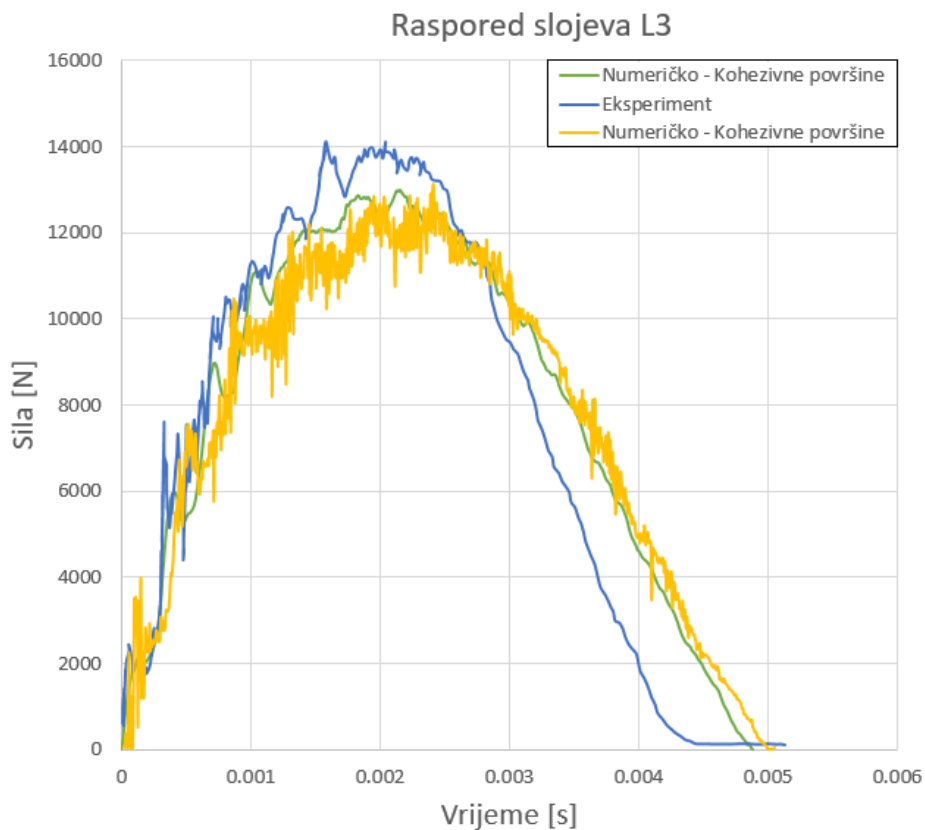
Slika 44., Slika 45. i Slika 46. prikazuju promjenu reakcijske sile uslijed udara u vremenu za obje numeričke metode i eksperiment te rasporede slojeva redom L1, L2 i L3. U sva tri slučaja obje numeričke metode vrlo dobro opisuju prvi dio udara uz nešto nižu maksimalnu silu naspram eksperimentalne, a u drugom dijelu prilikom „odbijanja“ udarača dolazi do nešto većeg odstupanja. Razlog tome može biti neadekvatno opisivanje mekšanja materijala prilikom odziva, ali i razlika između eksperimentalnih i numeričkih rubnih uvjeta. Nadalje, rezultati dobiveni korištenjem kohezivnih elemenata za sve rasporede slojeva iskazuju značajne oscilacije sile u vremenu, što je uzrokovano numeričkim nestabilnostima tijekom propagacije oštećenja [22].



Slika 44. Promjena reakcijske sile u vremenu tijekom udara – raspored slojeva L1

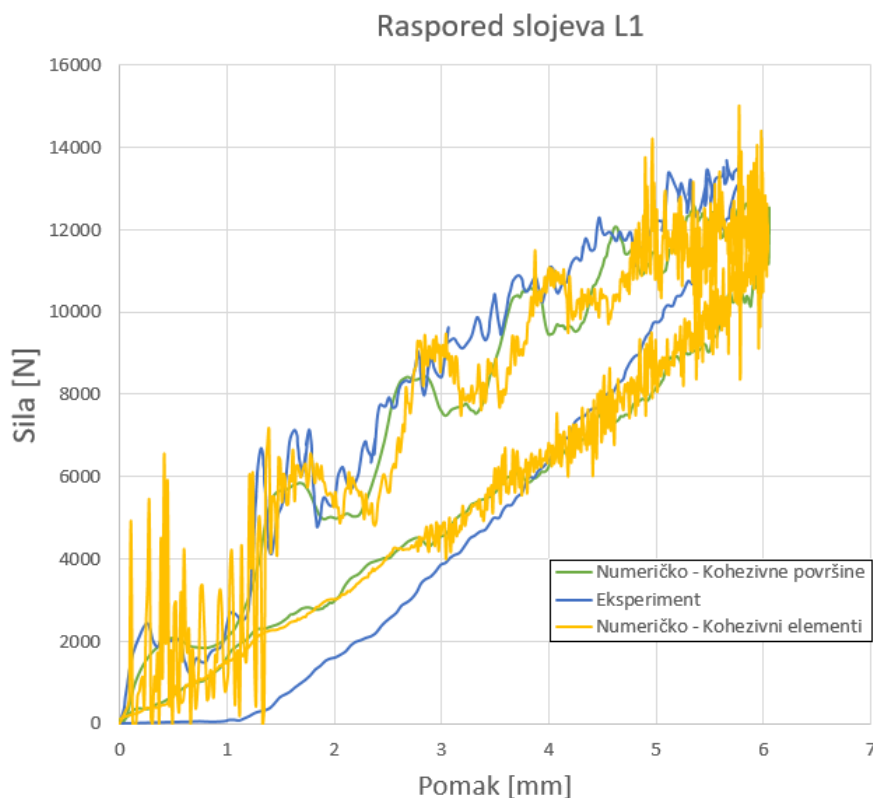


Slika 45. Promjena reakcijske sile u vremenu tijekom udara – raspored slojeva L2



Slika 46. Promjena reakcijske sile u vremenu tijekom udara – raspored slojeva L3

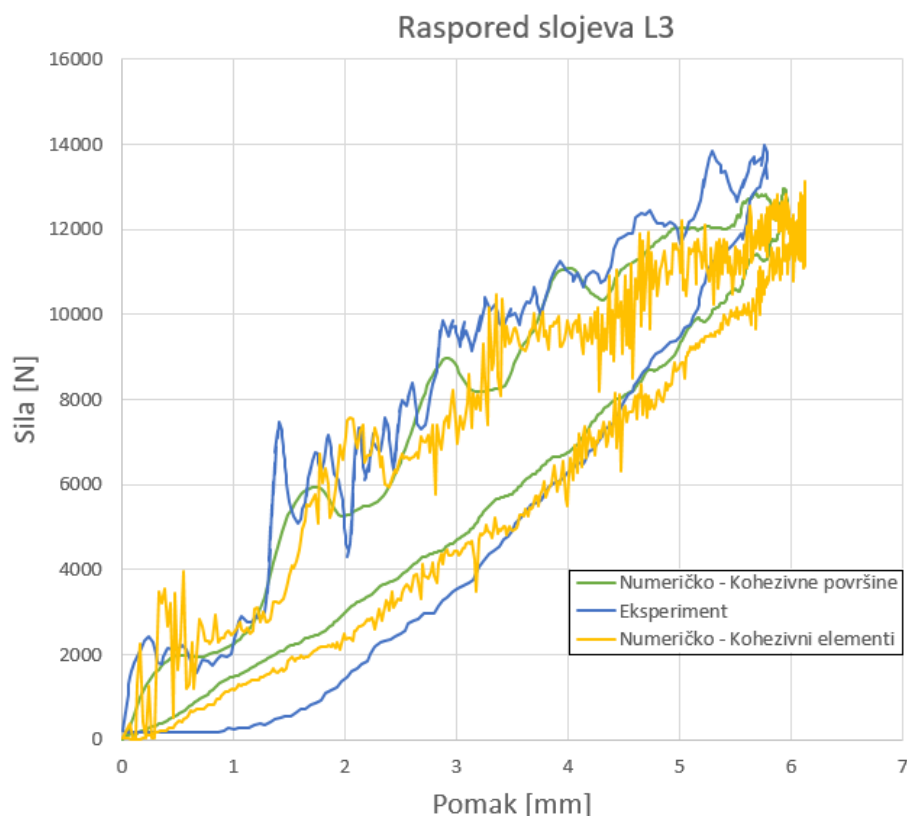
Slika 47., Slika 48. i Slika 49. prikazuju promjenu reakcijske sile u ovisnosti o pomaku udarača za obje numeričke metode i eksperiment te rasporede slojeva redom L1, L2 i L3.



Slika 47. Promjena reakcijske sile u ovisnosti o pomaku udarača – raspored slojeva L1



Slika 48. Promjena reakcijske sile u ovisnosti o pomaku udarača – raspored slojeva L2



Slika 49. Promjena reakcijske sile u ovisnosti o pomaku udarača – raspored slojeva L3

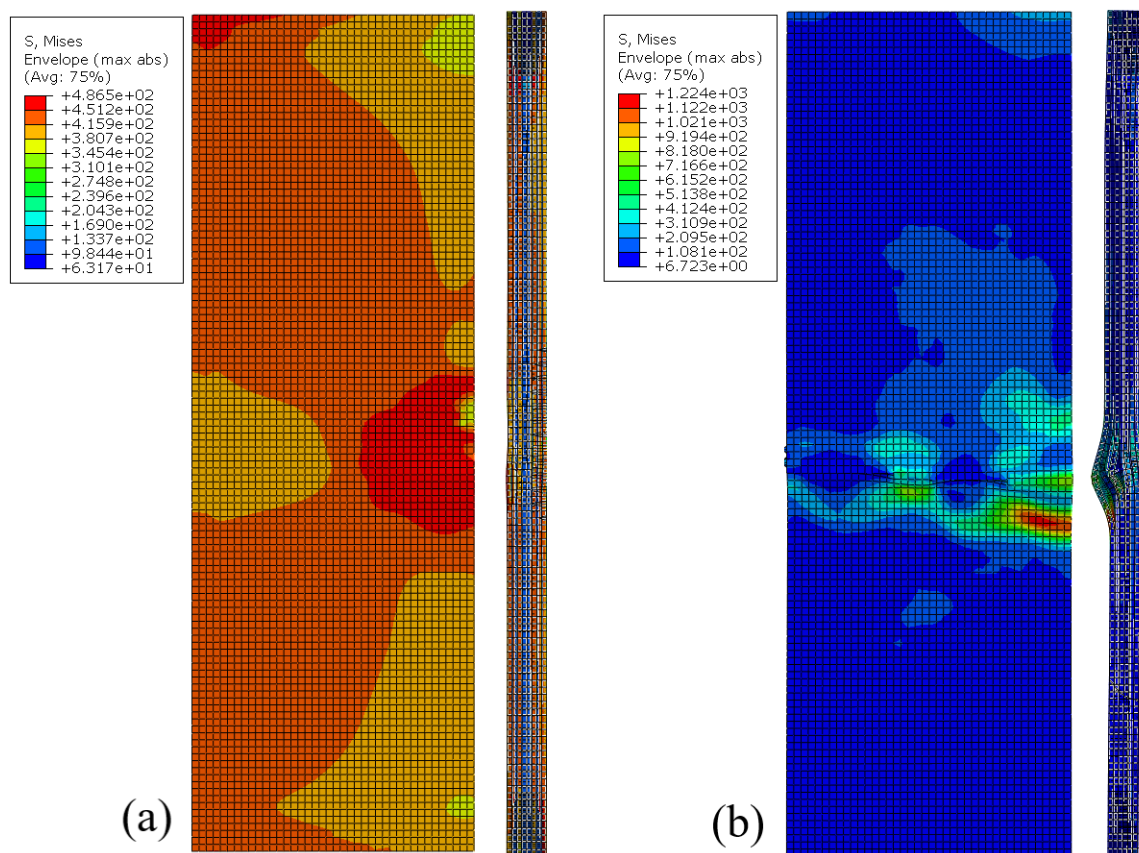
6.2. Tlačno ispitivanje nakon udara

Nakon prvog koraka – udara pri malim brzinama, proveden je korak stabilizacije, a posljednji na redu je korak provedbe tlačnog ispitivanja. Rezultati tlačnog ispitivanja za obje korištene metode, te usporedba s eksperimentalnim podacima [17] priloženi su u tablici 5. Greška je izračunata prema jednadžbi (14), samo što su se umjesto površina koristile vrijednosti sila. Prema eksperimentalnim podacima vrijednost kritične sile kod koje dolazi do gubitka krutosti, odnosno kolapsa konstrukcije je najveća za laminat s rasporedom slojeva L2, a najmanja za raspored slojeva L3. Analizom rezultata priloženih u tablici može se zaključiti kako su korištenjem kohezivnih elemenata dobiveni točniji rezultati naspram eksperimenta, iako i korištenje kohezivnih površina daje vrlo dobre rezultate za prva dva rasporeda slojeva.

Tablica 5. Rezultati tlačnog ispitivanja nakon udara i greška naspram eksperimenta

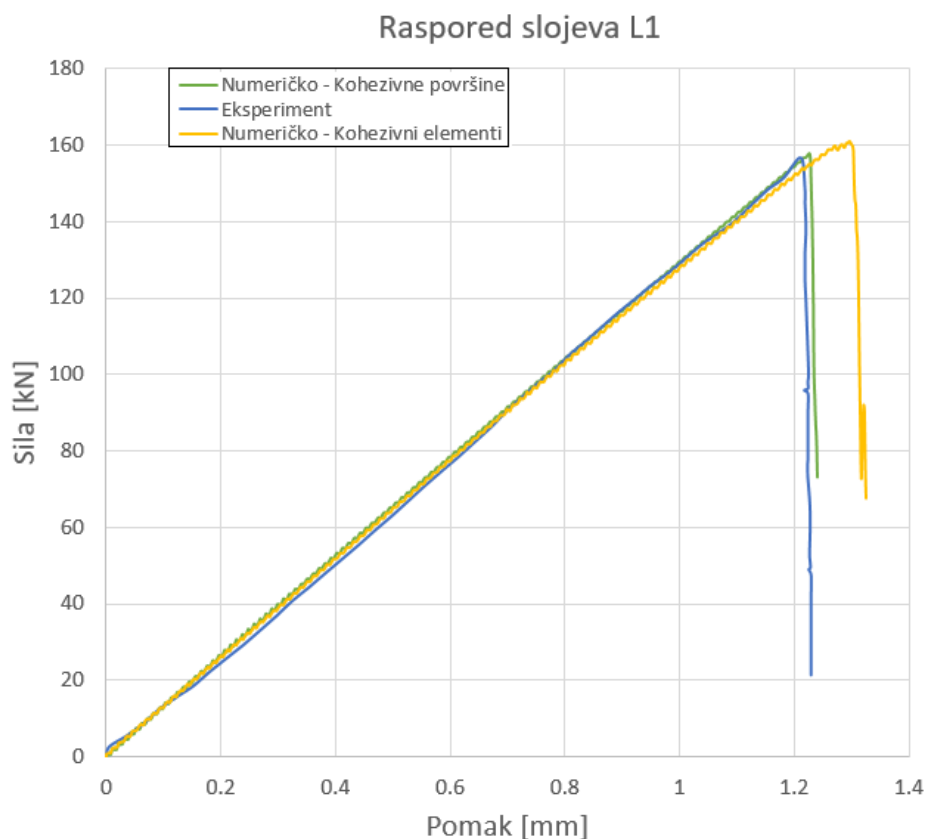
Raspored slojeva	Kohezivne površine		Kohezivne površine		Eksperiment Sila [kN]
	Sila [kN]	Greška [%]	Sila [kN]	Greška [%]	
L1	157,92	0,81	159,67	1,9	156,64
L2	146,63	-8,19	165,75	4,28	158,64
L3	183,2	21	139,75	-3,56	144,72

Slika 50. prikazuje presjek laminata iz pogleda od naprijed i s bočne strane u trenutku prije (a) i nakon gubitka krutosti odnosno loma ploče (b). Vidljivo je kako se u trenutku prije loma oko mjesta udara javljaju visoke vrijednosti ekvivalentnih naprezanja, a u trenutku nakon loma naglo opadaju. Do loma je došlo približno po sredini ploče, te se jasno vidi kako su oštećenja uzrokovana udarom propagirala u horizontalnom smjeru što je bilo i predviđeno u potpoglavlju 3.3 (Slika 11.). Na slici je prikazan lom laminata s rasporedom slojeva L3 za slučaj korištenja kohezivnih površina, no za sve ostale slučajeve lom se događa na isti način pa oni nisu prikazani. Također, na slici se jasno vidi i potpuno odvajanje gornjih slojeva laminata na mjestima gdje su se pojavile delaminacije.

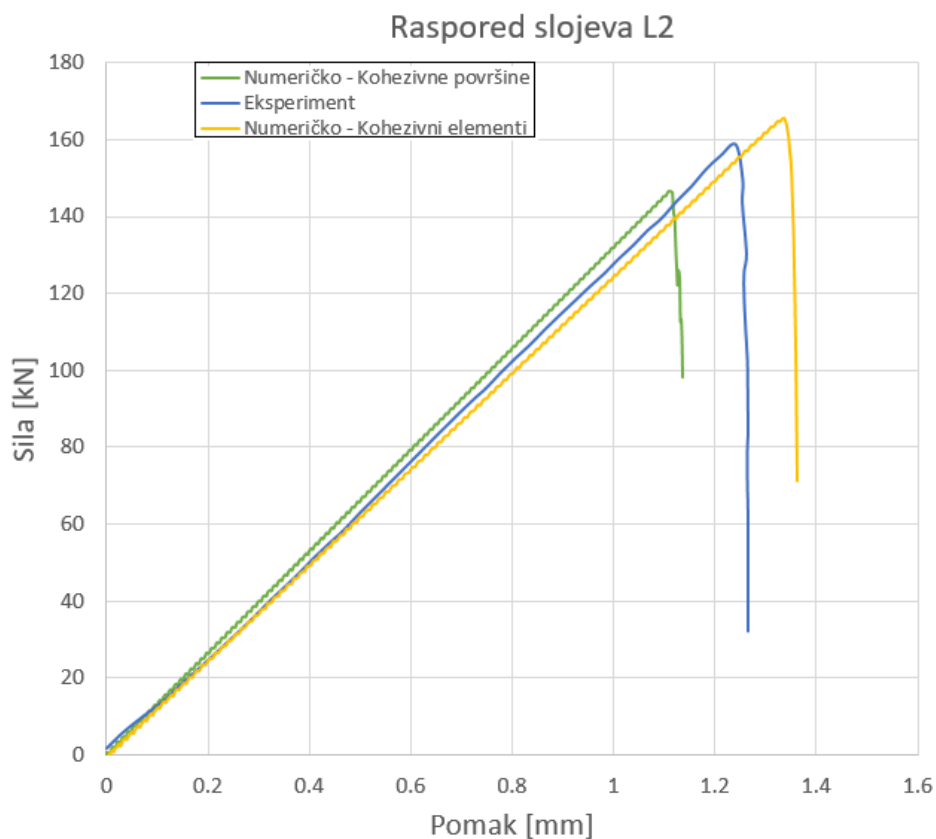


Slika 50. Presjek ploče; (a) trenutak prije loma, (b) trenutak nakon loma

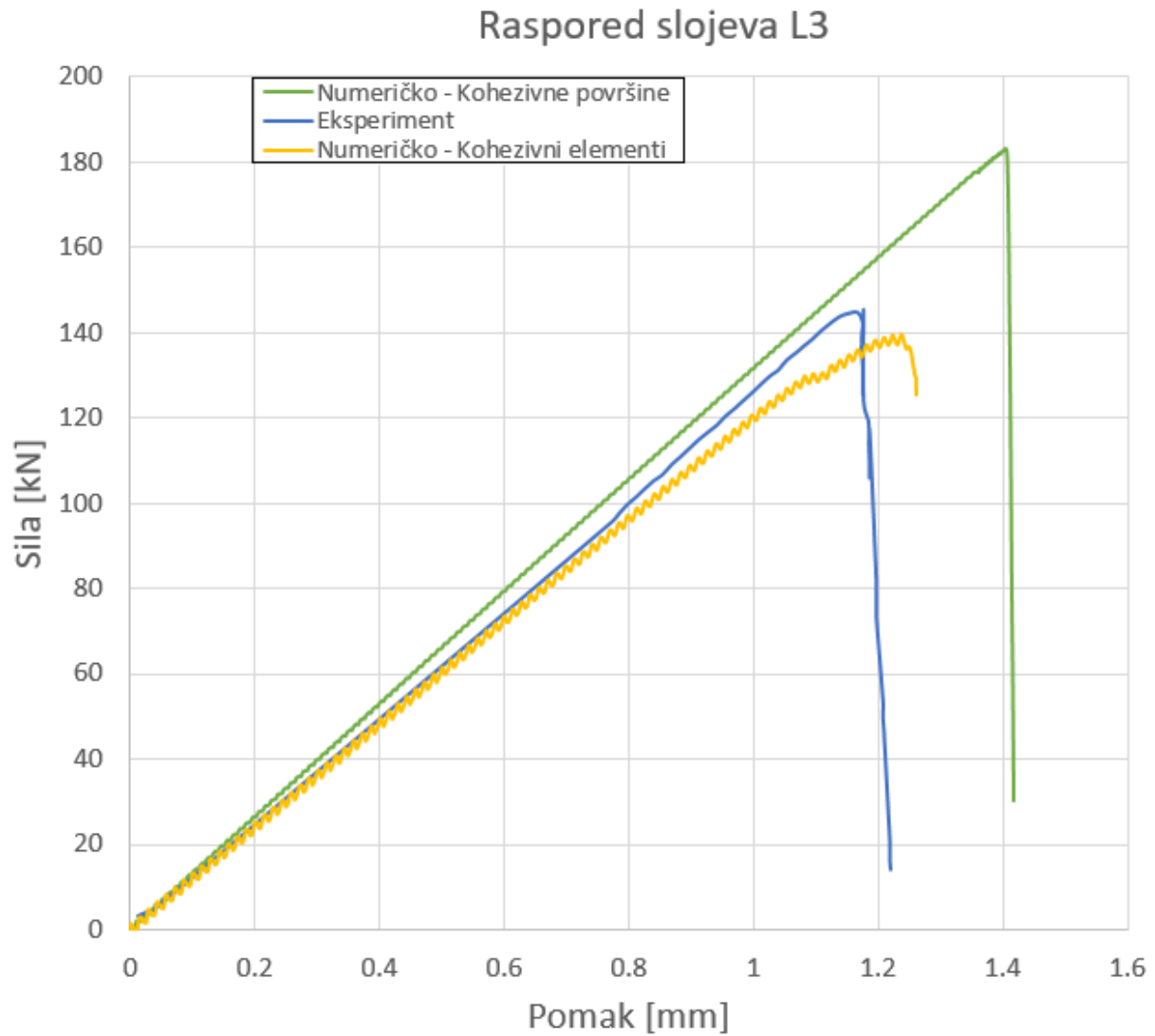
Slika 51., Slika 52. i Slika 53. prikazuju ovisnost primijenjene tlačne sile o pomaku za obje numeričke metode i eksperiment za rasporede slojeva redom L1, L2 i L3. Prema slikama je vidljivo da je za laminat s rasporedom slojeva L1 najbolje poklapanje numeričkih i eksperimentalnih rezultata, dok je za preostala dva rezultata uočeno blago odstupanje nagiba tangente od eksperimentalnog. Navedeno upućuje na neznatno drugačiju ukupnu krutost laminata, a odstupanje je veće s povećanjem broja međufaznih područja, naročito pri korištenju kohezivnih površina. To odstupanje krutosti posljedica je drugačijeg mekšanja materijala prilikom oštećivanja od onoga u stvarnosti.



Slika 51. Promjena tlačne sile u ovisnosti o pomaku – raspored slojeva L1



Slika 52. Promjena tlačne sile u ovisnosti o pomaku – raspored slojeva L2



Slika 53. Promjena tlačne sile u ovisnosti o pomaku – raspored slojeva L3

7. ZAKLJUČAK

U ovom radu provedena je složena numerička analiza udara pri malim brzinama i tlačnog ispitivanja nakon udara. Riječ je u računalno vrlo „skupoj“ simulaciji jer se analiza provodi u nekoliko koraka, uz relativno velik broj konačnih elemenata, postavljenih ograničenja, zatraženih ispisa varijabli te svojstava interakcije. Navedeno značajno utječe na vrijeme simulacije, ali i memorijski prostor potreban za pohranu jer je stabilan vremenski inkrement vrlo malen. Međuslojna područja laminata modelirana su korištenjem kohezivnih površina kao svojstva interakcije i korištenjem kohezivnih konačnih elemenata za tri različita *cross – ply* rasporeda slojeva.

Rezultati prezentirani u prethodnom poglavlju jasno pokazuju kako je korištenjem klasičnih, lako dostupnih podataka za mehanička svojstva kompozitnih materijala u ravnini sloja moguće dobro predvidjeti ponašanje kompozita prilikom udara i preostalu tlačnu čvrstoću. Pokazano je da se dobri rezultati mogu postići i korištenjem dostupnih modela oštećivanja za 2D stanje naprezanja iako bi s obzirom na karakter opterećenja prikladno bilo korištenje 3D modela oštećivanja. Obje objašnjene metode modeliranja međuslojnog područja dobro opisuju ponašanje pri udaru, ali su korištenjem kohezivnih elemenata bolje opisani oblici i ukupne površine delaminacija. Prilikom udara pratilo se popuštanje vlakna i matrice, te je uočeno dobro predviđanje pojave oštećenja prema pretpostavkama iz literature, odnosno na oba načina dominantna su bila oštećenja matrice i to u donjim (u odnosu na udarač) slojevima laminata. Nadalje, analizom rezultata tlačnog ispitivanja uočeno je vrlo dobro poklapanje s eksperimentalnim rezultatima za prva dva rasporeda slojeva i to korištenjem obje metode modeliranja kohezivne zone, dok je za treći raspored slojeva bolje poklapanje ostvareno samo korištenjem kohezivnih elemenata s debljinom.

Konačno, može se zaključiti da su u cijelini bolji rezultati ostvareni korištenjem kohezivnih elemenata s konačnom debljinom pri modeliranju kohezivne zone. Na kraju, za postizanje boljih rezultata, predložio bih korištenje 3D modela oštećivanja (Hashin, Puck) implementacijom kroz VUMAT potprograme i modeliranje realnih eksperimentalnih rubnih uvjeta te računala specijaliziranog za računalne simulacije.

LITERATURA

- [1] S. Abrate: Impact on composite structures, Cambridge University Press, 1998.
- [2] E.V. González, P. Maimí, P.P. Camanho, A. Turon, J.A. Mayugo: Simulation of drop-weight impact and compression after impact tests on composite laminates, *Composite Structures*, vol. 94; 3364-3378, 2012.
- [3] Daniele Ghelli, Giangiacomo Minak: Low velocity impact and compression after impact tests on thin carbon/epoxy laminates, *Composites: Part B*, vol. 42; 2067-2079, 2011.
- [4] I. Smojver, *Mehanika kompozitnih materijala*, Zagreb: nastavni materijal Fakulteta Strojarsva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, ver. 06/2007.
- [5] William d. Callister, *Materials Science and Engineering: An introduction*, Wiley, 2007.
- [6] P. Bhatt, A. Goe, Carbon fibres: Production, Properties and Potential Use, *Mat. Sci. Res. India*; 14(1), 2017.
- [7] <https://www.airbus.com/en/newsroom/news/2016-09-a-carbon-copy-the-no-2-a350-1000-rolls-out-sporting-the-a350-xwb-family> (16.6.2022.)
- [8] <https://www.supercars.net/blog/why-the-hennessey-venom-f5-is-a-genuine-300mph-contender/> (16.6.2022.)
- [9] C. H. Zweben, Composites: Overview, *Encyclopedia of Condensed Matter Physics*, 192-208, 2005.
- [10] ASM Handbook, *Corrosion: Environments and Industries*, vol. 13C, ASM International, 2001.
- [11] Yang, H. H.: *Kevlar Aramid Fibre*, John Wiley & Sons Ltd., England, 1993.
- [12] <https://www.chemicalrecycling.eu/knowledge/chemical-recycling-of-end-of-life-wind-turbine-blades-by-solvolyis-ht/> (14.6.2022.)
- [13] <https://www.prlog.org/11840066-solid-advanced-fiberglass-boat-luxury-yacht.html> (14.6.2022.)
- [14] <https://www.safeguardarmor.com/uk/ballistic-helmets/> (14.6.2022.)
- [15] https://www.ebay.com/str/amsuer?_trksid=p2047675.m145687.1149086 (14.6.2022.)
- [16] F. C. Campbell, *Structural composite materials*, ASM International, 2010.

- [17] G. Perillo and J.K. Jørgensen: Numerical/Experimental Study Of The Impact and Compression After Impact On GFRP Composite For Wind/Marine Applications, *Procedia Engineering*, vol. 167; 129-137, 2016.
- [18] R. P. Wool, X. S. Sun, *Bio – Based Polymers and Composites*, Academic Press, 2005.
- [19] M. F. Ismail, M.T. H. Sultan, A. Hamdan, A. U. M. Shah, M. Jawaid, Low velocity impact behaviour and post impact characteristics of kenaf/ glass hybrid composites with various weight ratios, vol. 8 (3); 2662-2673, *Journal of Materials Research and Technology*, 2019.
- [20] E.V. González, P. Maimí, P.P. Camanho, C. S. Lopes, N. Blanco, Effects of ply clustering in laminated composite plates under low-velocity impact loading, vol. 71; 805 --817, *Composites Science and Technology*, 2011.
- [21] E. Pietropaoli, *Advances in Composite Materials - Analysis of Natural and Man-Made Materials*, InTech; 463-480, 2011.
- [22] G. Perillo, N.P. Vedivik, A.T. Echtermeyer, Damage development in stitch bonded GFRP composite plates under low velocity impact: Experimental and numerical results, *Composite Structures*, 2012.
- [23] ASTM D7137 / D7137M: Standard Test Method for Compressive Residual Strength Properties of Damaged Polymer Matrix Composite Plates.
- [24] T. Jollivet, C. Peyrac, F. Lefebvre; *Damage of composite materials*, 2003.
- [25] Z. Hashin, Failure criteria for unidirectional fibre composites, vol. 48; 846-852, *Transactions of the ASME*, 1981.
- [26] Abaqus User Manual v2016.
<http://130.149.89.49:2080/v2016/index.html> (16.6.2022.)
- [27] J. Sorić, „Metoda konačnih elemenata“, *Golden marketing – Tehnička knjiga*, Zagreb, 2004.
- [28] M. El Moufari, L. El Bakkali, Effect of combination thermal and mechanical loading on delamination onset and growth of unidirectional composite materials, *Xème Conférence Internationale: Conception et Production Intégrées*, Tanger, 2015.