

# Modeliranje popuštanja kompozitnih konstrukcija u području spojeva

---

**Brezović, Kristijan**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2025**

*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:235:660188>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-14**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

Fakultet strojarstva i brodogradnje

## **DIPLOMSKI RAD**

**Kristijan Brezović**

ZAGREB, 2025.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

## **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

izv. prof. dr. sc. Darko Ivančević

Student:

Kristijan Brezović

ZAGREB, 2025.

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

*Zahvaljujem se svom mentoru izv. prof. dr. sc Darku Ivančeviću na svim savjetima i pomoći tijekom izrade ovog rada.*

Kristijan Brezović



Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 25 - 06 / 1	
Ur.broj: 15 - 25 -	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Kristijan Brezović**

JMBAG: 0035215041

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Modeliranje popuštanja kompozitnih konstrukcija u području spojeva**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Modelling of failure of composite structures in the joint regions**

Opis zadatka:

Kompozitne konstrukcije se često koriste u zrakoplovnim konstrukcijama zbog svoje visoke specifične čvrstoće i krutosti. Međutim, koncentracija naprezanja oko otvora, poput provrta za spojne elemente, predstavlja izazov u njihovom projektiranju. Popuštanje materijala oko otvorenih (engl. *Open-Hole*) i ispunjenih provrta (engl. *Filled-Hole*) u kompozitnim pločama može značajno utjecati na integritet i nosivost konstrukcije. Zadatak diplomskog rada je numeričko modeliranje detalja konstrukcije u području spojnih elemenata s ciljem procjene pouzdanosti numeričkih pristupa modeliranju oštećenja kompozitnih spojeva.

U diplomskom radu je potrebno:

- napraviti pregled mogućnosti numeričkog modeliranja oštećenja kompozita u programu *Abaqus*<sup>®</sup>
- izraditi numerički model kompozitne ploče s otvorenim provrtom te model ploče sa zatikom prema podacima u dostupnoj literaturi
- za modeliranje koristiti prikladne vrste konačnih elemenata, a simulacije provesti koristeći *Abaqus/Standard* ili *Abaqus/Explicit*
- provesti validaciju numeričkih modela usporedbom s eksperimentalnim rezultatima
- modelirati realan detalj kompozitne konstrukcije u području spojeva
- 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:

28. studeni 2024.

30. siječnja 2025.

6., 7. i 10. veljače 2025.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Darko Ivančević

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Milan Vrdoljak

# Sadržaj

<b>Sadržaj</b>	<b>i</b>
<b>Popis slika</b>	<b>iii</b>
<b>Popis tablica</b>	<b>vi</b>
<b>Popis oznaka</b>	<b>vii</b>
<b>Sažetak</b>	<b>x</b>
<b>Abstract</b>	<b>xi</b>
<b>1 Uvod</b>	<b>1</b>
<b>2 Kompozitni materijali</b>	<b>3</b>
2.1 Vlakna . . . . .	5
2.1.1 Ugljična vlakna . . . . .	6
2.1.2 Staklena vlakna . . . . .	7
2.1.3 Aramidna vlakna . . . . .	8
2.2 Matrice . . . . .	9
2.2.1 Epoksidne smole . . . . .	9
<b>3 Načini popuštanja</b>	<b>11</b>
3.1 Međupovršinsko odljepljivanje . . . . .	11
3.2 Mikrolom matrice . . . . .	12
3.3 Međupovršinsko klizanje . . . . .	12
3.4 Delaminacija . . . . .	13
3.5 Lom vlakna . . . . .	13
3.6 Popuštanje vlakana uslijed izvijanja . . . . .	14
3.7 Popuštanje uslijed pojave šupljina . . . . .	15

---

<b>4</b>	<b>Kriteriji popuštanja</b>	<b>17</b>
4.1	Hashin-ov kriterij popuštanja . . . . .	17
4.1.1	Implementacija u Abaqus/CAE . . . . .	18
4.2	LaRC05 kriterij popuštanja . . . . .	19
4.2.1	Popuštanje matrice . . . . .	19
4.2.2	Popuštanje uslijed izvijanja vlakna . . . . .	21
4.2.3	Popuštanje vlakna uslijed vlačnog opterećenja . . . . .	23
4.2.4	Propagacija oštećenja . . . . .	23
4.2.5	Implementacija u Abaqus/CAE . . . . .	27
<b>5</b>	<b>Modeliranje diskontinuiteta pomoću XFEM-a</b>	<b>29</b>
5.1	Funkcije obogaćivanja čvorova . . . . .	29
5.2	Metoda kohezivnih segmenata i fantomski čvorovi . . . . .	29
5.3	Metoda nivo skupa . . . . .	30
5.4	Implementacija u Abaqus FEA . . . . .	31
5.4.1	XFEM u pretprocesoru Abaqus/CAE . . . . .	32
<b>6</b>	<b>Numerički modeli</b>	<b>34</b>
6.1	Validacijski model . . . . .	34
6.2	Model realnog detalja . . . . .	40
<b>7</b>	<b>Rezultati</b>	<b>46</b>
7.1	Rezultati validacije . . . . .	46
7.2	Rezultati zakovičnih spojeva . . . . .	55
<b>8</b>	<b>Zaključak</b>	<b>74</b>
	<b>Literatura</b>	<b>76</b>

# Popis slika

2.1	Konstruktivski elementi izrađeni od kompozita različitih materijala matrice	4
2.2	Oblici ojačala u kompozitima: a) duga vlakna, b) čestice, c) kratka vlakna, d) tkanine [7]	4
2.3	Krivulje naprezanja - istezanja za različite materijale vlakna [9]	5
2.4	Rola ugljičnih vlakana IM9 24k proizvođača Hexcel [10]	6
2.5	Rola staklenih S2 Glass vlakana [16]	7
2.6	Rola aramidnih vlakana [17]	8
2.7	Infracrvena fotografija <i>Space Shuttlea</i> prilikom ulaska u atmosferu koji je na donjem dijelu trupa koristio CMC kao toplinski štit [19]	9
2.8	Nanošenje epoksidne smole na tkaninu od ugljičnih vlakana [23]	10
3.1	Mikrograf međupovršinskog odljepljivanja [25]	11
3.2	Mikro pukotine u materijalu matrice [26]	12
3.3	Delaminacija uslijed udara male brzine [27]	13
3.4	Mikrograf oštećenja vlakana uslijed testa savijanja u tri točke [29]	14
3.5	Mikrograf ravnine izvijanja vlakana kompozita s tkanim vlaknima (eng. <i>non crimp</i> ) s definicijom geometrijskih parametara u analizi izvijanja vlakana [32]	15
4.1	Ekstrapolirane krivulje za longitudinalno i transverzalno tlačno stanje naprezanja za dva različita kompozita [31]	21
4.2	Koordinatni sustav u ravnini pukotine [31]	22
4.3	Model formacije pojasa izvijanja [31]	23
4.4	Propagacija pukotine za $\alpha = 0$ [31]	25
4.5	Propagacija pukotine za $\alpha \neq 0$ [31]	25
5.1	Obogaćena mreža konačnih elemenata [38]	30
5.2	Trodimenzionalna pukotina opisana s dvije funkcije $\Phi$ i $\Psi$ [39]	31
5.3	Propagacija pukotine/a kroz obogaćenu zonu/e [37]	32



5.4	Obogaćena zona geometrije ispitnog uzorka . . . . .	33
6.1	Dimenzije testnog uzorka, [mm] . . . . .	34
6.2	Tri načina otvaranja pukotine . . . . .	36
6.3	Rubni uvjeti epruvete . . . . .	37
6.4	Energije kvazi-statičke simulacije u Abaqus/Explicit . . . . .	37
6.5	Mreža konačnih elemenata u validacijskom modelu . . . . .	38
6.6	Primjer greške u vrijednosti nivo skupa - dvije pukotine u elementu . . . . .	39
6.7	Uspješna propagacija pukotine/a u kompozitu s dva sloja . . . . .	39
6.8	Preklopni dvoredni spoj, [mm] . . . . .	40
6.9	Jednostični četveroredni spoj, [mm] . . . . .	41
6.10	Optimalni raspored slojeva za zakovični spoj kod kompozita [45] . . . . .	42
6.11	Svojstva interakcije površina u spojevima: a) preklopni spoj; b) stični dvoredni, c) stični dvoredni s lijepljenim ojačanjem . . . . .	43
6.12	Rubni uvjeti spojeva: a) preklopni spoj; b) stični dvoredni . . . . .	44
6.13	Mreža konačnih elemenata na preklopnom spoju s detaljem oko otvora . . . . .	45
6.14	Mreža konačnih elemenata na stičnom spoju s detaljem oko otvora . . . . .	45
7.1	Usporedba dijagrama sila-pomak . . . . .	46
7.2	Deformirani elementi koji nisu ispunili uvjet brisanja varijablom DAMA-GEFT . . . . .	47
7.3	Usporedba epruvete u trenutku potpunog loma [41] s DAMAGEMC i LARCMCCRT varijablama . . . . .	47
7.4	Raspodjela LaRC05 kriterija loma matrice . . . . .	48
7.5	LaRC05 kriterij loma matrice na rubu otvora . . . . .	49
7.6	Raspodjela LaRC05 kriterija izvijanja vlakana . . . . .	49
7.7	LaRC05 kriterij izvijanja vlakna na rubu otvora . . . . .	50
7.8	Raspodjela LaRC05 kriterija loma vlakana . . . . .	50
7.9	LaRC05 kriterij loma vlakana na rubu otvora . . . . .	51
7.10	Raspodjela LaRC05 kriterija vlačnog opterećenja vlakana . . . . .	51
7.11	LaRC05 kriterij vlačnog opterećenja vlakna . . . . .	52
7.12	Raspodjela Hashin-ovog kriterija vlaka matrice . . . . .	52
7.13	Hashin-ov kriterij vlačnog opterećenja matrice . . . . .	53
7.14	Raspodjela Hashin-ovog kriterija vlačno opterećenje vlakana . . . . .	53
7.15	Hashin-ov kriterij vlačnog opterećenja vlakana . . . . .	54
7.16	Hashin-ov kriterij tlačnog opterećenja matrice . . . . .	54
7.17	Raspodjela Hashin-ovog kriterija vlačnog opterećenja vlakana . . . . .	54

7.18	Usporedba dijagrama sila-pomak za tri spoja . . . . .	56
7.19	Mehanizmi popuštanja zakovičnih spojeva: a) <i>Net-tension Failure</i> b) <i>Shear Out</i> . . . . .	57
7.20	Oblici popuštanja tri promatrana spoja prikazani HSNMTCRT varijablom	57
7.21	Usporedba raspodjele von Mises naprezanja [MPa] na okviru stičnog spoja: a) stični pri maksimalnoj sili, b) stični ojačani pri maksimalnoj sili, c) stični ojačani pri maksimalnoj sili . . . . .	58
7.22	Raspodjela LaRC05 kriterija popuštanja na panelima preklopnog spoja . .	59
7.23	Raspodjela Hashin-ovog kriterija popuštanja na panelima preklopnog spoja	60
7.24	Raspodjela parametara oštećenja na panelima stičnog spoja . . . . .	61
7.25	Raspodjela LaRC05 kriterija popuštanja na panelima stičnog spoja . . . .	62
7.26	Raspodjela Hashin-ovog kriterija popuštanja na panelima stičnog spoja . .	63
7.27	Raspodjela parametara oštećenja na panelima stičnog spoja . . . . .	64
7.28	Raspodjela LaRC05 kriterija popuštanja na okviru stičnog spoja . . . . .	65
7.29	Raspodjela Hashin-ovog kriterija popuštanja na okviru stičnog spoja . . .	66
7.30	Raspodjela parametara oštećenja na okviru stičnog spoja . . . . .	67
7.31	Raspodjela LaRC05 kriterija popuštanja na panelima ojačanog stičnog spoja	68
7.32	Raspodjela Hashin-ovog kriterija popuštanja na panelima ojačanog stičnog spoja . . . . .	69
7.33	Raspodjela parametara oštećenja na panelima ojačanog stičnog spoja . . .	70
7.34	Raspodjela Larc05 kriterija popuštanja na okviru ojačanog stičnog spoja .	71
7.35	Raspodjela Hashin-ovog kriterija popuštanja na okviru ojačanog stičnog spoja . . . . .	72
7.36	Raspodjela parametara oštećenja na okviru ojačanog stičnog spoja . . . .	73

## Popis tablica

2.1	Svojstva IM7 vlakna proizvođača Hexcel [12] . . . . .	6
2.2	Klasifikacija staklenih vlakana prema svojstvima [14] . . . . .	7
2.3	Usporedba svojstava E i S vlakna [4] . . . . .	8
2.4	Svojstva DuPont™ Kevlar® 49 aramidnih vlakna [12] . . . . .	8
4.1	Izlazne varijable Hashin-ovog kriterija popuštanja . . . . .	18
4.2	Indeksi i odgovarajući načini popuštanja . . . . .	28
4.3	Izlazne varijable LaRC05 kriterija popuštanja . . . . .	28
6.1	Svojstva materijala CCF800/AC531 [41][31] . . . . .	35
6.2	Energije loma za Hashin-ov kriterij [42] . . . . .	35
6.3	Energije loma za LaRC05 kriterij [41][31] . . . . .	36
6.4	Mreža konačnih elemenata testne epruvete . . . . .	38
6.5	Svojstva PH-17 čelika [44] . . . . .	41
6.6	Svojstva ljepila Scotch-Weld 9323 B/A [46] . . . . .	43
6.7	Mreža konačnih elemenata preklopnog spoja . . . . .	44
6.8	Mreža konačnih elemenata stičnog spoja . . . . .	45
7.1	Maksimalna sila eksperimenta i numeričke analize . . . . .	46
7.2	Maksimalni iznosi sila u spojevima . . . . .	56

## Popis oznaka

Oznaka	Definicija	Jedinica
$a_0$	ekvivalentni otvor pukotine	mm
$D$	tenzor elastičnosti	N/mm <sup>2</sup>
$d$	parametar oštećenja	-
$d^{inst}$	instantna vrijednost koeficijenta oštećenja	-
$E_1$	modul elastičnosti u smjeru materijalne osi 1	N/mm <sup>2</sup>
$E_2$	modul elastičnosti u smjeru materijalne osi 2	N/mm <sup>2</sup>
$E_3$	modul elastičnosti u smjeru materijalne osi 3	N/mm <sup>2</sup>
$FI_{FC}$	indeks popuštanja uslijed tlačnog opterećenja	-
$FI_{FT}$	indeks popuštanja uslijed vlačnog opterećenja	-
$FI_{KINK}$	indeks popuštanja uslijed izvijanja vlakna	-
$FI_{MC}$	indeks kriterija popuštanja uslijed loma matrice	-
$FI_{MT}$	indeks popuštanja uslijed tlačnog opterećenja matrice	-
$FI_{SPLIT}$	indeks popuštanja uslijed loma vlakna	-
$G_{Ic}$	kritična brzina oslobađanja energije I načina otvaranja pukotine	J/m <sup>2</sup>
$G_{IIc}^L$	longitudinalna kritična brzina oslobađanja energije II načina otvaranja pukotine	J/m <sup>2</sup>
$G_{IIc}^T$	transverzalna kritična brzina oslobađanja energije II načina otvaranja pukotine	J/m <sup>2</sup>
$G_{ij}$	modul smicanja u materijalnoj x-y ravnini	N/mm <sup>2</sup>
$h$	ukupna debljina svih međusobno spojenih slojeva iste orijentacija	mm
$n$	koeficijent zasićenja pukotine	-
$S_L^{is}$	longitudinalna in-situ smična čvrstoća	N/mm <sup>2</sup>
$S_T^{is}$	transverzalna in-situ smična čvrstoća	N/mm <sup>2</sup>
$S_L$	smična čvrstoća u longitudinalnom smjeru	N/mm <sup>2</sup>

Oznaka	Definicija	Jedinica
$S_T$	smična čvrstoća u transverzalnom smjeru	N/mm <sup>2</sup>
$t$	debljina konačnog elementa	mm
$\mathbf{t}$	nominalni vektor naprezanja	N/mm <sup>2</sup>
$\bar{\mathbf{t}}$	efektivni vektor naprezanja	N/mm <sup>2</sup>
$U_{crack}$	energija utrošena na stvaranje pukotine	J
$U_{delam}$	energija utrošena na stvaranje delaminacije	J
$X_C$	tlačna čvrstoća u smjeru vlakna	N/mm <sup>2</sup>
$X_T$	vlačna čvrstoća u smjeru vlakna	N/mm <sup>2</sup>
$Y$	geometrijski koeficijent	-
$Y_T^{is}$	transverzalna in-situ vlačna čvrstoća	N/mm <sup>2</sup>
$Y_C$	tlačna čvrstoća okomito na smjer vlakna	N/mm <sup>2</sup>
$Y_T$	vlačna čvrstoća okomito na smjer vlakna	N/mm <sup>2</sup>
$\alpha$	kut loma matrice	°
$\alpha_0$	kut loma matrice za slučaj čistog <i>in-plane</i> transverzalnog tlaka	°
$\gamma_{ij}$	kutna deformacija u <i>ij</i> smjeru	-
$\gamma_{m^0}$	kutna deformacija u inicijalnoj neusklađenosti vlakna	-
$\varepsilon$	tenzor deformacije	-
$\varepsilon^0$	deformacija u trenutku pojave oštećenja	-
$\varepsilon^d$	deformacija u trenutku pojave delaminacije	-
$\varepsilon_{123}^{el}$	elastična deformacija u materijalnom koordinatnom sustavu	-
$\varepsilon^f$	deformacija u trenutku potpune dekohezije	-
$\varepsilon_i$	deformacija u <i>i</i> smjeru	-
$\eta_L$	koeficijent trenja u longitudinalnom smjeru	-
$\eta_T$	koeficijent trenja u transverzalnom smjeru	-
$\nu$	Poissonov koeficijent	-
$\nu_{ij}$	Poissonov koeficijent u <i>ij</i> ravnini	-
$\rho$	gustoća materijala	kg/m <sup>3</sup>
$\sigma$	tenzor naprezanja	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{123}$	nominalni tenzor naprezanja u materijalnom koordinatnom sustavu	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{lmn}$	nominalni tenzor naprezanja u koordinatnom sustavu pukotine	N/mm <sup>2</sup>

Oznaka	Definicija	Jedinica
$\bar{\sigma}_{123}$	efektivni vektor naprezanja u materijalnom koordinatnom sustavu	N/mm <sup>2</sup>
$\bar{\sigma}_{lmn}$	efektivni vektor naprezanja u materijalnom koordinatnom sustavu	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma^0$	naprezanje u trenutku pojave oštećenja	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_i$	naprezanje u smjeru pravca $i$	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_N$	normalna komponenta naprezanja	N/mm <sup>2</sup>
$\tau_{ij}$	smično naprezanje u $ij$ ravnini	N/mm <sup>2</sup>
$\tau_L$	longitudinalno smično naprezanje	N/mm <sup>2</sup>
$\tau_{m^0}$	smično naprezanje u inicijalnoj neusklađenosti vlakna	N/mm <sup>2</sup>
$\tau_T$	transverzalna smična komponenta naprezanja	N/mm <sup>2</sup>
$\varphi$	kut neusklađenosti	°
$\varphi^0$	inicijalni kut neusklađenosti	°
$\varphi^c$	kut neusklađenosti pri popuštanju uslijed longitudinalnog tlaka	°
$\xi_2$	područje ispod krivulje ( $\sigma_2, \varepsilon_2$ )	N/mm <sup>2</sup>
$\xi_L$	područje ispod krivulje ( $\tau_L, \gamma_L$ )	N/mm <sup>2</sup>
$\xi_T$	područje ispod krivulje ( $\tau_T, \gamma_T$ )	N/mm <sup>2</sup>
$\Psi$	kut pojasa izvijanja	°

## Sažetak

U ovom radu uspoređena su dva kriterija popuštanja kompozita jednosmjernih slojeva, Hashin-ov kriterij popuštanja i LaRC05 kriterij koji je dostupan tek u novijim verzijama *Abaqus*® programa. Dok Hashin-ov kriterij razlikuje četiri načina popuštanja konstituenata prema vlačnom i tlačnom opterećenju, LaRC05 kriterij razlikuje popuštanje kompozita na četiri načina: lom matrice, izvijanje i lom vlakana te popuštanje vlakana uslijed vlaka; što predstavlja veliku prednost u dimenzioniranju konstrukcije. Najprije su u radu iznesene teorijske podloge kompozitnih materijala i njihovih načina popuštanja, a potom su opisani kriteriji popuštanja koji su fokus usporedbe. Nakon toga objašnjena je XFEM numerička metoda pomoću koje se računa propagacija oštećenja, primijenom LaRC05 kriterija. U sedmom poglavlju opisana je izrada numeričkog modela validacije i tri realna detalja zakovičnih spojeva što uključuje svojstva materijala i kontakta, rubne uvjete i mrežu konačnih elemenata. U osmom poglavlju predstavljeni su rezultati dobiveni provođenjem modela u programu *Abaqus/CAE* koristeći *Abaqus/Standard* i *Abaqus/Explicit* solvere kao dijagrami sila-pomak, vizualni prikaz područja popuštanja i krivulje indeksa popuštanja na području otvora za validacijski model. U posljednjem poglavlju iznesen je zaključak na temelju dobivenih rezultata i iskustava sakupljenih prilikom iterativnog postupka pripreme i provedbe modela simulacija.

**Ključne riječi:** LaRC05 kriterij popuštanja, Hashin kriterij popuštanja, *Abaqus*, metoda konačnih elemenata, XFEM

# Abstract

In this thesis, a comparison was made between two failure criteria for unidirectional composite laminates, Hashin's criterion and LaRC05 criterion, which is available in the newer versions of *Abaqus*® software. While Hashin's criterion differs constituent failures according to tensile and compressive load, LaRC05 criterion distinguishes composite failure as four different modes: matrix cracking, fiber kinking and splitting and fiber tensile; which represents a significant advantage during the design process. Firstly, theoretical background on composite materials and their failure modes was brought out, after which two failure criteria that are focus of the comparison were described. Next, the XFEM numerical method, which is used while simulating damage propagation in LaRC05 criterion, was explained. In the seventh chapter, the numerical model for both the validation coupon and the realistic riveted joint were explained which includes material properties and contact properties, boundary conditions and finite element mesh. In the eighth chapter, the results of all the simulations are analyzed and are obtained by running the simulations in Abaqus/CAE using Abaqus/Standard and Abaqus/Explicit solvers. The results include force-displacement diagrams, failure modes distributions and failure criteria indices plots. In the last chapter a conclusion was put forward based on the results and experiences gathered during the process of preparation and implementation of the simulation models.

**Key words:** LaRC05 failure criterion, Hashin failure criterion, Abaqus, Finite Element Method, XFEM



## Uvod

# 1

Kompozitni materijali u posljednjih 40 godina pokazali su se kao efikasna zamjena za tradicionalne materijale na avionima i ostalim letjelicama poput aluminijske. Njihova visoka specifična čvrstoća i krutost pružaju slična svojstva konstrukcije ali sada s velikim smanjenjem mase što snižava troškove eksploatacije. Razvojem kompozitnih materijala pojavila se potreba za numeričkim modelima koji će što pouzdanije predvidjeti njihovo popuštanje. Kako je to pokazala međusobna usporedba kriterija popuštanja u WWFE II (eng. *The World Wide Failure Exercise II*), postoji značajna diskrepancija između eksperimentalnih i numeričkih rezultata koji proizlaze korištenjem raznih kriterija popuštanja. Ovakve usporedbe inicirane su s ciljem usporedbe i validacije postojećih i novopredloženih kriterija. Ta inicijativa pokazala je da postoje primjetne razlike poput: neki kriteriji predlažu otvorene a neki zatvorene krivulje naprezanja, neki kriteriji mogli su predvidjeti čvrstoću materijala tek pod određenim uvjetima opterećenja te je utvrđena značajna osjetljivost na ulazne parametre [1]. Uz iznesene probleme pokazala se potreba razvoja kriterija koji će predvidjeti različite načina popuštanja u matrici i vlaknima. Jedan od takvih kriterija je i LaRC05 kriterij koji je u ovom radu uspoređen s Hashin-ovim kriterijem popuštanja. Kompoziti se na avionima koriste u mnogim dijelovima konstrukcije, a veliku prepreku predstavlja njihovo spajanje posebice na mjestima velikih naprezanja. Zakovični spojevi desetljećima su činili osnovu konstrukcije zrakoplova, koji zbog korištenja aluminijske kao glavnog materijala, nisu bili pogodni kandidati za spajanje konstrukcija zavarivanjem. Aluminijski, za razliku od čelika, ima nisku razinu taljenja te zbog toga tijekom zavarivanja može doći do izvijanja i loma, a kod toplinski obrađenih dijelova i smanjivanja čvrstoće, što bi značajno utjecalo na sigurnost eksploatacije aviona. Razvojem kompozitnih materijala, njihov udio u avionima se povećao te su polako zamijenili aluminijski kao većinski materijal na avionima. S obzirom da bušenje i montaža zakovica može značajno oštetiti kompozit i unijeti diskontinuitet u geometriju, spajanje kompozita preporučuje se lijepljenjem, kojim se bolje raspoređuju naprezanja po spoju. Usprkos tome, lijepljeni spojevi imaju i svoje nedostatke. Pored plastičnih deformacija koje se mogu javiti na lijepljenim spojevima, s

lijepljenim spojevima dolaze i konstrukcijska ograničenja. Idealni lijepljeni spoj kompozitnih dijelova, *scarf joint* dimenzioniran je omjerom čvrstoće vlakna i smične čvrstoće matrice tzv. *scarf ratio* [2]. Ako je vlačna čvrstoća vlakna  $3000 \text{ N/mm}^2$ , a smična čvrstoća matrice  $30 \text{ N/mm}^2$ , sa sadržajem vlakna od 80 %, *scarf ratio* iznosit će 1/120, što predstavlja duljinu preklopa u spoju od 120 mm, ukoliko se spajaju ploče debljine 1 mm [2]. Kada se uspoređuje mogućnost uporabe vijčanih ili zakovičnih spojeva, u pravilu se izbjegava korištenje vijaka u nosivim konstrukcijama, zbog loših svojstava preuzimanja naprezanja u području navoja. U mehaničkim kompozitnim spojevima nije dopušteno zajedničko korištenje vijaka i zakovica. Cilj ovog rada je usporedba dva kriterija popuštanja kao i njihova primjena na zakovične spojeve koji se nalaze na lokaciji spoja dviju sekcija trupa.

# 2

## Kompozitni materijali

Materijali koji se sastoje od dva osnovna konstituenta ili člana: ojačala i matrice, nazivaju se kompozitima. Dok ojačalo, kao nosivi element, daje čvrstoću i preuzima opterećenje na konstrukciji, matrica veže ojačalo, prenosi opterećenje na ojačalo i štiti ga od vanjskih uvjeta [3]. Generalno, kompoziti kao ojačala imaju vlakna ili čestice koje su kruće i čvršće od kontinuirane matrice faze. Njihova primjena ne ovisi samo o konstrukcijskim svojstvima, već i o električnim, toplinskim te onim tribološkim. Svrha kompozita je da kombinacijom dva materijala ima svojstva koja su zajedno superiornija od svojstva ta dva izdvojena konstituenta.

Kompozitni materijali podijeljeni su u dvije kategorije [4]. Prva kategorija razlikuje vrste matrice konstituenta:

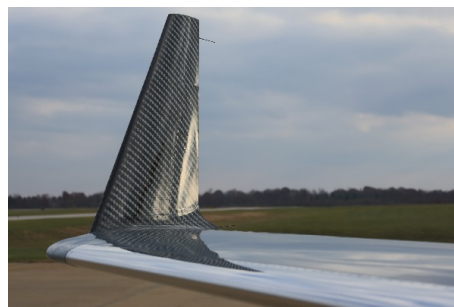
- a) PMC (*eng. Polymer-Matrix Composites*) - Kompoziti s polimernim matricama
- b) C/C (*eng. Carbon/Carbon Composites*) - Kompoziti s ugljičnim matricama
- c) CMC (*eng. Ceramic-Matrix Composites*) - Kompoziti s keramičkim matricama
- d) MMC (*eng. Metal-Matrix Composites*) - Kompoziti s metalnim matricama.

Na slici 2.1 prikazane su tipične izvedbe CMC i PMC kompozita na avionima. PMC i C/C kompoziti spadaju pod kompozite s organskim matricama (*eng. OMC - Organic-Matrix Composites*). Carbon/Carbon kompoziti nastaju iz PMC kompozita s dodatnim korakom karbonizacije, odnosno zgušćavanja polimerne matrice. Druga kategorija svrstava kompozite prema vrsti (obliku) ojačala tj. vlakna [4]:

- a) duga vlakna (*eng. continuous fiber*)
- b) čestice (*eng. particulate*)
- c) kratka vlakna (*eng. whiskers*)
- d) tkanine (*eng. woven composites*).



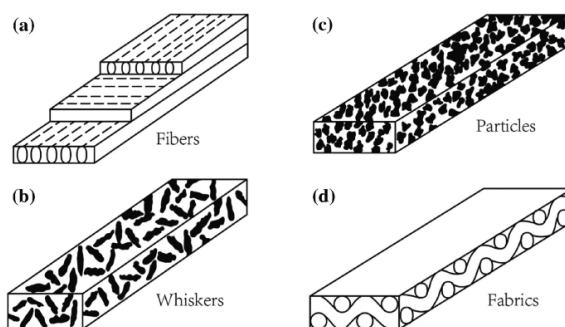
(a) Lopatice turboventilatorskog motora izrađene od CMC kompozita [5]



(b) Winglet lakog aviona izrađen od PMC kompozita [6]

Slika 2.1: Konstrukcijski elementi izrađeni od kompozita različitih materijala matrice

Duga vlakna duljine su značajno veće od njihovog poprečnog presjeka. Kako je i prikazano na slici 2.2 a), slojevi dugih vlakna mogu se slagati jedan na drugi, proizvoljnih orijentacija vlakna, ne bi li se zadobila mehanička svojstva koja su najbolja za zadanu ulogu. Čestičnim ojačalima smatraju se sva ojačala kojima su sve dimenzija sličnog iznosa. One mogu doći u obliku sfera (eng. *spheres*), prutića (eng. *rods*), ili ljuskica (eng. *flakes*) [4]. Kratka vlakna promjera su do  $10\ \mu\text{m}$  i duljina do 0,1 m. Kratka vlakna s omjerom duljine i promjera od 20 do 100 najčešće se koriste u MMC kompozitima u kombinaciji s česticama [4]. Kompozit mora sadržavati najmanje 10 % volumnog udjela ojačala za zadovoljavajuća svojstva, dok se najčešći volumni udjeli kreću u intervalu od 60 % do 70 % [4]. Što se tiče tkanina, njihova prednost dolazi zbog njihove "suhe" forme, odnosno bez unaprijed aplicirane npr. polimerne matrice. Njihova prednost je lakše rukovanje i lakše prijanjanje visoko zakrivljenim površinama u usporedbi s jednosmjernim vlaknima.



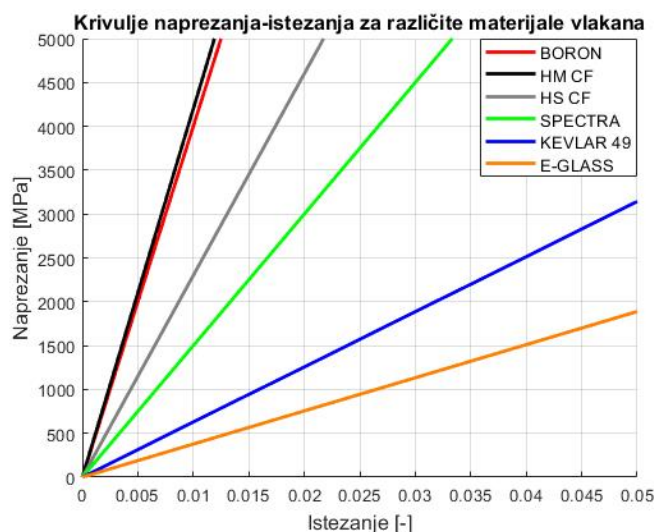
Slika 2.2: Oblici ojačala u kompozitima: a) duga vlakna, b) čestice, c) kratka vlakna, d) tkanine [7]

Kompoziti dolaze u mnogim formama no daleko najpoznatiji oblik su preprezi. Riječ prepreg je skraćenica pojma *pre-impregnated fibres* odnosno, vlakna na koja je već nanesena djelomično polimerizirana matrica [8]. Najzastupljeniji preprezi su oni s ugljičnim

vlaknima i epoksidnom smolom, no još se koriste i S-Glass-epoksid i aramid-epoksid kompoziti. Prednosti preprega su kontrola volumnog udjela vlakna i lakoća rukovanjem prilikom proizvodnje, a mogu se koristiti i bez korištenja autoklava [8].

## 2.1 Vlakna

Vlakna su uglavnom ugljična, staklena i aramidna. Na slici 2.3 prikazan je Hooke-ov dijagram za različite materijale vlakna. Crnom linijom prikazana su ugljična vlakna visoke čvrstoće i standardnog modula (*eng. High Strength/Standard Modulus - HS*) koja su i najzastupljenija u uporabi [4]. Sivom bojom prikazana su ugljična vlakna visokog modula (*eng. High Modulus - HM*). Zelena boja predstavlja polietilen vlakna komercijalnog naziva *Spectra* koja se koriste u medicinskoj, vojnoj zaštitnoj opremi, kao i u užadi te zaštitnoj opremi otpornoj na rezanje [4]. Aramidna vlakna, kojima je komercijalni naziv *Kevlar* označena su plavom bojom. Neki od dijelova u zrakoplovnoj industriji koji se izrađuju od aramidnih vlakna mogu biti vrata podvozja, napadni i izlazni rubovi krila i kontrolnih ploha (zbog svoje visoke otpornosti na udarna oštećenja), propeleri, helikopterske lopatice, podovi, gondole motora i dr. [4]. *E-Glass* kompozitna vlakna, na slici 2.3, staklena su vlakna i daleko su najupotrebljenija vlaknasta ojačala. Među ostalim, koriste se i kao visokotemperaturni izolator za električne vodiče [4]. Zanimljiva alternativa *E-Glass* vlaknima su *S-Glass* vlakna, npr. *S2-Glass* vlakna koja se koriste u *GLARE* (*eng. GLASS REinforced laminate*) kompozitima od kojih je napravljen dio trupa Airbus-a A380 te njegovi napadni rubovi repnih ploha. *S-Glass* vlakna pružaju značajno veću vlačnu čvrstoću i modul elastičnosti od *E-Glass* vlakana.



Slika 2.3: Krivulje napreznja - istezanja za različite materijale vlakna [9]

### 2.1.1 Ugljična vlakna

Kompozitni dijelovi izrađeni od *CF* (eng. *Carbon Fiber - ugljična vlakna*) imaju pet puta veću čvrstoću i pet puta manju masu od dijelova napravljenih od 1020 čelika [4]. U usporedbi s aluminijskom legurom 6061 imaju jedan i pol puta manju masu i sedam puta veću čvrstoću [4]. Na slici 2.4 prikazane su role IM9 ugljičnih vlakna proizvođača Hexcel. S obzirom na svoju visoku temperaturnu otpornost, primijenjuju se na mlaznicama raketnih motora i zrakoplovnim kočnicama. Na mikroskopskoj razini, ugljična vlakna



Slika 2.4: Rola ugljičnih vlakana IM9 24k proizvođača Hexcel [10]

sastoje se od vrpčastih kristalita međusobno isprepletenih, orijentiranih približno paralelno longitudinalnoj osi vlakna. Svaki od tih vrpčastih kristalita sastoji se od grafenskih ravnina unutar kojih su atomi ugljika povezani jakim kovalentnim silama, dok su međusobno ravnine povezane slabim van der Waalsovima silama [11]. Jake kovalentne sile daju vlaknima visoku krutost i čvrstoću, dok zbog van der Waalsovih sila imaju smanjenu smičnu čvrstoću. Unaprjeđenje svojstava ugljičnih vlakna vrši se plastičnom deformacijom kroz razvlačenje ili toplinsku obradu. U tablici 2.1 prikazana su svojstva IM7 vlakna proizvođača Hexcel. IM7 vlakna su ugljična vlakna na bazi poliakrilonitrila (PAN).

Tablica 2.1: Svojstva IM7 vlakna proizvođača Hexcel [12]

Svojstva IM7 vlakna	
Vlačna čvrstoća	5670 MPa
Modul elastičnosti	276 GPa
Produljenje pri lomu	1,8 %
Gustoća	1,78 g/cm <sup>3</sup>
Promjer filamenta	5,2 μm
Udio ugljika	95 %

U usporedbi s kompozitima sa staklenim, aramidnim ili keramičkim vlaknima imaju značajno veću otpornost na zamor, a pri rasterećenju konstrukcije također pokazuju potpuni elastični povrat [13].

### 2.1.2 Staklena vlakna

Staklena vlakna dobivaju se iz sirovina koje sadrže silicijev dioksid ( $\text{SiO}_2$ ) imajući tako zapravo beskonačno veliku zalihu za proizvodnju. Staklena vlakna svrstavaju se u 6 kategorija [14]: Kategorija E spada u vlakna niske cijene i opće uporabe, dok su vlakna oznaka S, C, M, A i D vlakna za posebnu uporabu. Vlakna opće uporabe čine 90 % cijele uporabe i koriste se za procese poput ojačanja, filtracije, izolacije i dr. [15]. Na slici 2.5 prikazana su S2 Glass vlakna koja se, kao što je i već spomenuto, koriste u *GLARE* kompozitima na avionu Airbus A380. U tablici 2.2 opisana je klasifikacija staklenih vlakna, a u tablici 2.3 su uspoređena svojstva E i S vlakna.



Slika 2.5: Rola staklenih S2 Glass vlakana [16]

Tablica 2.2: Klasifikacija staklenih vlakana prema svojstvima [14]

<b>Klasifikacija staklenih vlakna</b>	
E	Niska električna provodljivost
S	Visoka čvrstoća
C	Visoka kemijska otpornost
M	Visoka krutost
A	Visoka alkalnost
D	Niska permitivnost

Tablica 2.3: Usporedba svojstava E i S vlakna [4]

	Vlačna čvrstoća	Modul elastičnosti	Produljenje pri lomu	Gustoća
E-Glass	3100 - 3800 MPa	76 - 81 GPa	4,5 - 4,9 %	2,54 - 2,62 g/cm <sup>3</sup>
S-Glass	4380 - 4590 MPa	88 - 91 GPa	5,4 - 5,8 %	2,48 - 2,49 g/cm <sup>3</sup>

### 2.1.3 Aramidna vlakna

U počecima svoje komercijalne eksploatacije aramidna vlakna imala su najveću specifičnu čvrstoću među svim komercijalno dostupnim vlaknima. Zbog svojih izrazito povoljnih svojstava poput male mase, visoke čvrstoće i velike tvrdoće koriste se u kompozitnim materijalima, balističkoj zaštitnoj opremi, užadi i kao zamjena za azbest u kočionim pločicama. Glavni oblik u kojem aramidna vlakna dolaze su isprepletene tkanine, u raznim debljinama ovisno o primjeni i obliku kalupa i složenosti geometrije. Za zrakoplovnu industriju posebno su zanimljiva vlakna visokog modula elastičnosti koja se koriste u općem zrakoplovstvu i na helikopterima, točnije kao oplata sendvič konstrukcija. U tablici 2.4 iznesena su svojstva aramidnih vlakana, a ista su prikazana na slici 2.6.

Tablica 2.4: Svojstva DuPont™ Kevlar® 49 aramidnih vlakna [12]

<b>Svojstva Kevlar® 49 Aramidnih vlakna</b>	
Vlačna čvrstoća	3000 MPa
Modul elastičnosti	112 GPa
Produljenje pri lomu	3,5 %
Gustoća	1,44 g/cm <sup>3</sup>
Poissonov koeficijent	0,36
Spec. topl. kapacitet	1,42 J/m°C

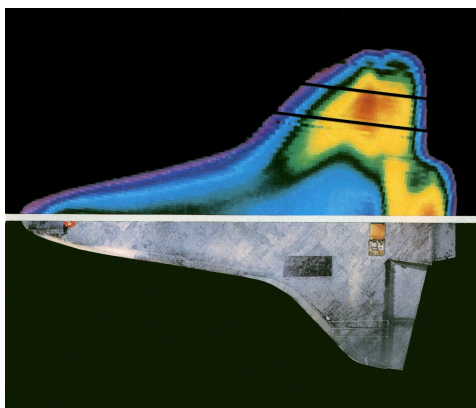


Slika 2.6: Rola aramidnih vlakana [17]



## 2.2 Matrice

Kompozitne matrice mogu biti izrađene od polimera, metala i keramike. Od polimernih matrica najupotrebljenije su epoksidne, dok se još koriste poliesterske i fenolne smole. Od metalnih matrica postoje one od aluminijskih legura (poput 2124 durala i 7075 konstruk-tala), aluminij-skandij legure te titanijeve legure. Keramičke matrice zbog svoje odlične toplinske otpornosti koriste se u dijelovima mlaznih motora kao lopatice turbina, ili oplata komora za izgaranje, dok se u svemirskoj i zrakoplovnoj industriji koriste kao toplinski štitovi na svemirskim kapsulama i hipersoničnim letjelicama [18]. Uz navedene matrice još se koriste i matrice na bazi ugljika (*C/C*) koje su korisne u uvjetima visoke temperature ili uvjetima visoko korozivne okoline. Kompozitni materijali s ovakvim matricama koriste se na novijim svemirskim letjelicama poput *Dragon* svemirske kapsule kompanije SpaceX ili svemirske kapsule *Starliner* kompanije Boeing. Na slici 2.7 prikazana je infracrvena fotografija *Space Shuttle*-a koji je koristio CMC kompozite.



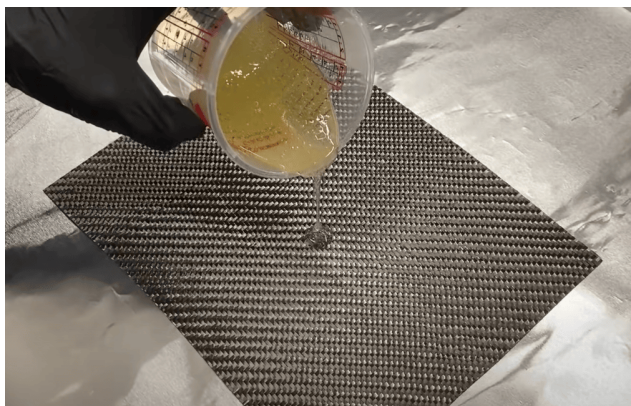
Slika 2.7: Infracrvena fotografija *Space Shuttlea* prilikom ulaska u atmosferu koji je na donjem dijelu trupa koristio CMC kao toplinski štit [19]

### 2.2.1 Epoksidne smole

Epoksidne smole su umjetne smole koje sadržavaju epoksidne skupine i očvršćuju u reakciji s katalizatorima [20]. Spadaju u kategoriju polimera duromera (*eng. thermoset*) odnosno polimera koji se dobivaju ireverzibilnim formiranjem tj. stvrdnjavanjem viskozne smjese. Karakterizira ih visoka toplinska otpornost a uz to pružaju visoku čvrstoću, prijanjaju na razne površine, dobri su električni izolatori i dr. Kako lako ovlažuju površine, odlični su za primjenu s kompozitima. Koriste se kao matrice s ugljičnim i staklenim vlaknima na dijelovima aviona od podova do stabilizacijskih površina [4]. Epoksidne smole su najkorišteniji materijali matrica za kompozitne dijelove visokih mehaničkih svojstava u

zrakoplovstvu zbog svoje niske cijene, jednostavnije uporabe i ostalih prethodno navedenih svojstava.

Najupotrebljenije epoksidne smole su diglicilni eter bisfenol A (*DGEBA*), korišten u široko rasprostranjenom prepregu HexCel IM7/8552 [21], bisfenol F i novolac epoksidne smole dobivene reakcijom fenola i formaldehida [22]. Prilikom nanošenja, epoksidna smola je u tekućem obliku kao što je to prikazano na slici 2.8.

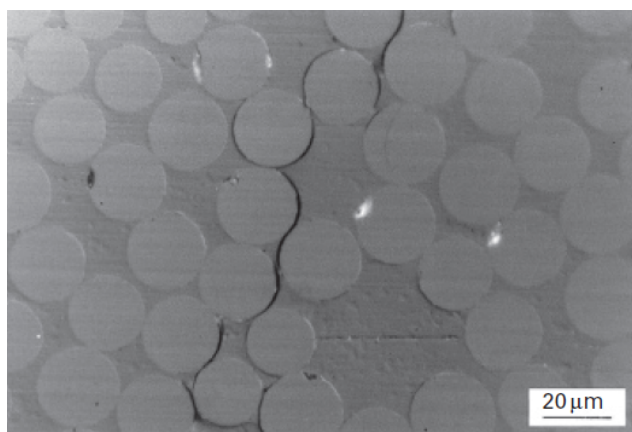


Slika 2.8: Nanošenje epoksidne smole na tkaninu od ugljičnih vlakana [23]

## Načini popuštanja

### 3.1 Međupovršinsko odljepljivanje

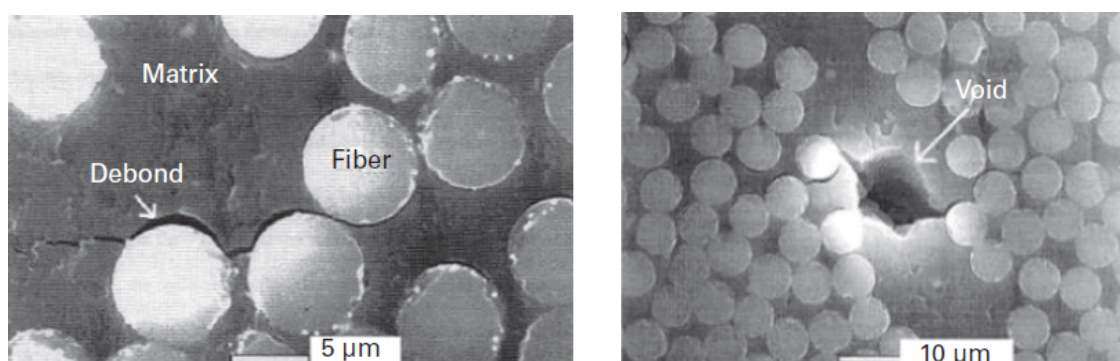
Međupovršinsko odljepljivanje (*eng. interfacial debonding*) u izravnoj je vezi s adhezivnom vezom između vlakna i matrice. Kako je ta površina dodira bitna u prijenosu naprezanja na spoju matrica-vlakno, ukoliko ta veza nije dovoljno jaka, može doći do loma matrice pri relativno niskim vrijednostima opterećenja, što je upravo slučaj kod jednosmjernih kompozita. Ova veza također definira i utjecaj ostalih načina popuštanja poput međupovršinskog klizanja (*eng. interfacial slippage*) i izvlačenja vlakna (*eng. fiber pull-out*) [24]. Za slučaj longitudinalnog međupovršinskog odljepljivanja pokazano je da za slučaj kada vlakna imaju veću čvrstoću od materijala matrice, propagacija pukotine stati će upravo u trenutku dodira s vlaknom ako naprezanje nije dovoljno veliko (pukotina u ovom slučaju može nastati uslijed uključina, praznina ili zračnih mjehurića u matrici). Postoji i mogućnost da će se propagacija pukotine nastaviti oko vlakna s posljedicom lokalizacije vršnih naprezanja na vlaknima, te zbog smičnog naprezanja koje nadilazi smičnu čvrstoću adhezivne veze, nastaviti međupovršinsko odljepljivanje duž vlakna [24]. Na slici 3.1 prikazana je propagacija pukotine duž spoja vlakna-matrica.



Slika 3.1: Mikrograf međupovršinskog odljepljivanja [25]

## 3.2 Mikrolom matrice

S obzirom na loša svojstva u transverzalnom smjeru na vlakna, često dolazi do razvoja mikropukotina niz dužinu vlakna koja su i prvi oblik oštećenja koji se zapaža u kompozitu. Ovakve mikropukotine mogu se širiti u smjeru debljine višeslojnog kompozita od neke nesavršenosti u sloju (kao i međuslojnog odljepljivanja) i nastaviti u smjeru vlakna u nekom od slojeva. Najčešće ovakve pukotine nastaju uslijed vlačnog naprezanja u kompozitu ali i uslijed zamora kao i promjena u temperaturi ili temperaturnom ciklusu. Lom u matrici značajno snižava krutost kompozita te dovodi do ozbiljnijih načina popuštanja poput delaminacije ili loma vlakna [24]. Slika 3.2 pod a) prikazuje odljepljivanje adhezivne veze između matrice i vlakna a pod b) propagaciju pukotine iz praznine u materijalu.



(a) Lom matrice uslijed odljepljivanja adhezivne veze

(b) Lom matrice uslijed praznine u materijalu

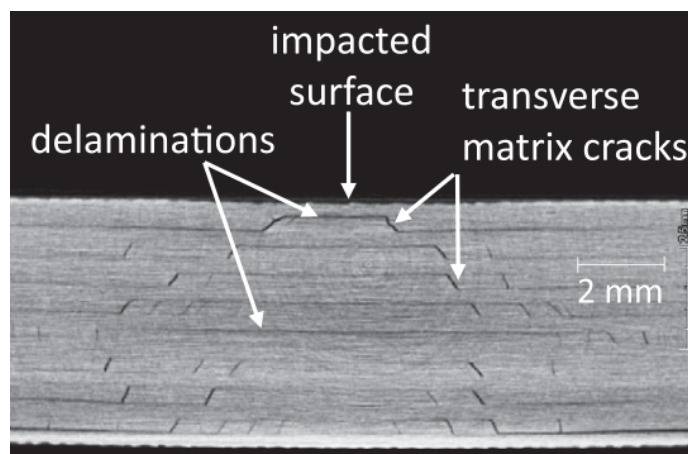
Slika 3.2: Mikro pukotine u materijalu matrice [26]

## 3.3 Međupovršinsko klizanje

Međupovršinsko klizanje (*eng. interfacial sliding*) predstavlja pomak na mjestu dodira konstituenata kompozita tj. matrice i vlakna. Do pojave međupovršinskog klizanja može doći otpuštanjem zaostalih termičkih naprezanja u kompozitu u kojem nema adhezivne veze između vlakna i matrice (do zaostalih termičkih naprezanja je došlo prilikom vezanja konstituenata uslijed različitih vrijednosti toplinskog proširenja - tzv. *shrink-fit* mehanizam). Ukoliko postoji adhezivna veza između matrice i vlakna, do međupovršinskog klizanja može doći i uslijed međupovršinskog odljepljivanja [24].

### 3.4 Delaminacija

Delaminacija predstavlja odvajanje slojeva (laminata) kompozita, a uzrokovana je lomom međuslojne plohe tj. područja bogatog matricom između dva sloja. Delaminacija se najčešće pojavljuje na mjestima provrta ili otvora i slobodnim rubovima panela [24]. Ovakvo oštećenje najčešće se događa uslijed djelovanja smičnog naprezanja koje je rezultat opterećenja u ravnini sloja [24]. Delaminaciju također mogu uzrokovati i udarna opterećenja, pa čak i ona malih brzina poput padanja alata na površinu kompozita. Delaminacija se može odviti i unutar kompozita što je bitan detalj u kontekstu vizualne inspekcije kompozitnih dijelova. S obzirom da su međuslojna čvrstoća i žilavost loma, tj. svojstva matrice, ta koja diktiraju nastanak i razvoj delaminacije, potrebno je, uz adekvatan raspored slojeva, poboljšati ista ne bi li se eliminirao problem delaminacije. Na slici 3.3 prikazan je mikrograf oštećenja pri udaru male brzine (eng. *Barely Visible Impact Damage, BVID*).

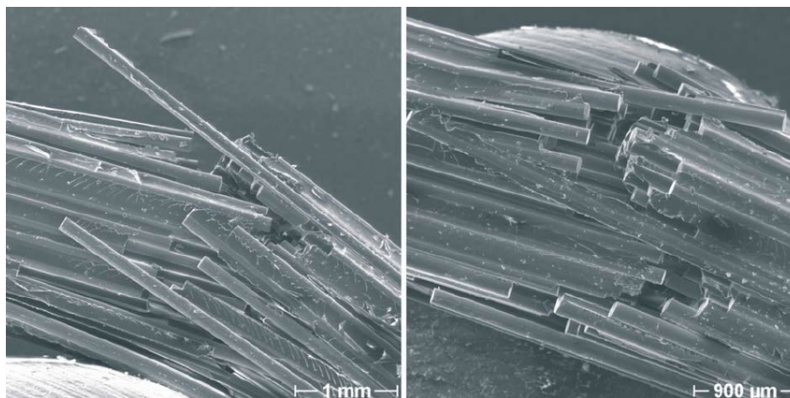


Slika 3.3: Delaminacija uslijed udara male brzine [27]

### 3.5 Lom vlakna

Popuštanje kompozita ojačanih vlaknima, primarno je uzrokovano lomom vlakana. U jednosmjernom kompozitu koji je opterećen vlačno, pojedinačna vlakna se lome na mjestima na kojima su konstrukcijski najslabija te se raspodjela naprezanja prenosi na vlakna susjedna onom koje je doživjelo lom. S obzirom da međupovršinska veza prenosi naprezanja na susjedna vlakna, ukoliko je iznos maksimalne čvrstoće dosegnut, moguć je lom dodatnih vlakana. Kako je raspodjela naprezanja po dužini vlakna kao i redistribucija naprezanja neuniformna, ovaj proces spada u područje statističke analize. U slučajevima kada su jednosmjerni slojevi poslagani proizvoljnim redoslijedom u višeslojnom kompozitu,

naprezanja u vlaknima susjednih slojeva povećana su u blizini pukotine u izvornom sloju uzrokujući usku raspodjelu lokacija loma vlakana [28]. S obzirom na statističku narav loma vlakana, teško je odrediti vlačnu čvrstoću pojedinog sloja u višeslojnom kompozitu, a ujedno i napredovanje loma u susjednim vlaknima [24]. Slika 3.4 prikazuje mikrograf polomljenih vlakana nakon testa savijanja u tri točke koja su izvučena iz materijala matrice.



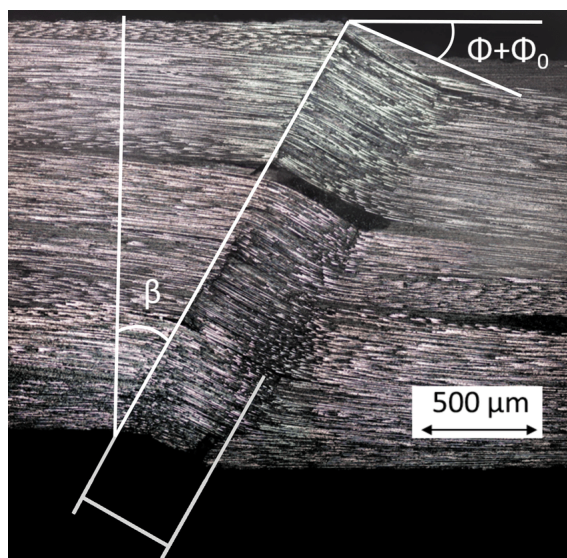
Slika 3.4: Mikrograf oštećenja vlakana uslijed testa savijanja u tri točke [29]

### 3.6 Popuštanje vlakana uslijed izvijanja

Izvijanje vlakana (*eng. fiber kinking*) način je popuštanja kojeg definira lokalizirana kutna deformacija matrice u području pojasa (*eng. kink band*) zajedno s lomom vlakna na krajevima tog pojasa [30]. *Kink band* pojas prikazan je na slici 3.5, a omeđen je s gornje i donje strane vanjskim slojem vlakana, te pravcima koji su pod kutom  $\beta$  u odnosu na ostala vlakna u sloju. Popuštanje uslijed tlačnog opterećenja kod kompozita najmanje je istražen način popuštanja. Dio istraživača smatra da se ono događa uslijed mikro-izvijanja dok drugi to gledaju kao poseban način popuštanja. Ukoliko bi se ovo popuštanje dogodilo uslijed izvijanja vlakna, bilo bi za očekivati da će pojas izvijanja biti okomit na os opterećenja i u ravnini maksimalnih naprezanja što bi značilo da je kut pojasa izvijanja jednak  $0^\circ$ . No, eksperimentalnim postupcima dobivena je vrijednost kuta pojasa izvijanja u iznosu od  $30^\circ$  [30]. Pojasevi izvijanja u materijalu se zapažaju tek nakon popuštanja kompozita [31]. Ono što je ipak zajedničko ovim dvjema granama razmišljanja je da one ne govore kako će točno doći do pojave pojaseva izvijanja.

Postupak popuštanja vlakana uslijed izvijanja popraćen je prvo lomom matrice između vlakana i rezultat je visokog smičnog naprezanja koje je uzrokovano popuštanjem susjednih slojeva. Ova visoka smična naprezanja mogu se pojaviti uslijed proizvodnih defekata kao što su neusklađenost orijentacije vlakna. Lom matrice zatim uzrokuje dodatno izvijanje vlakana koje rezultira dodatnim lomom matrice. Vlakna se naposljetku lome, te zajedno u

kombinaciji s izvijanjem i tlakom uzrokuju pojavu pojasa izvijanja. Promatranjem eksperimentalnih rezultata moguće je zaključiti da mikroizvijanje nije nužno glavni uzročnik ovog načina popuštanja [31]. Na slici 3.5 kut  $\varphi_0$  predstavlja inicijalni kut neusklađenosti, dok je  $\varphi$  onaj dodatni dobiven opterećenjem kompozitnog sloja/slojeva. Kut  $\beta$  označava kut pojasa izvijanja te će u ostatku rada biti označavan kao  $\Psi$ .



Slika 3.5: Mikrograf ravnine izvijanja vlakana kompozita s tkanim vlaknima (eng. *non crimp*) s definicijom geometrijskih parametara u analizi izvijanja vlakana [32]

U eksperimentima kombiniranjem longitudinalnog tlaka i ravninskog smika za kompozite s ugljičnim vlaknima kao ojačalima i epoksidnom smolom kao matricom (T300/LY556-HY917-DY070) uočeno je da se izvijanje vlakana pojavljuje samo za apsolutne vrijednosti longitudinalnog tlaka većeg od  $\frac{X_C}{2}$ . Za slučaj longitudinalnog tlaka u svezi s transverzalnim vlakom rezultati za materijal T800/924 ukazuju na to da pojas izvijanja ne nastaje za vrijednosti niže od  $X_C$  [31].

### 3.7 Popuštanje uslijed pojave šupljina

Kompozitni materijali podložni su mnogim defektima nastalim u proizvodnji. Defekti u vlaknima dijele se na neusklađenost orijentacije vlakna, neravnomjernu raspodjelu vlakana u matrici i već unaprijed polomljena vlakna. Defekti u matrici podijeljeni su na šupljine, odljepljivanje međupovršinskih veza i delaminacije. Kao najzastupljeniji defekt, šupljine su uzrokovane uvjetima proizvodnje poput iznosa podtlaka vakuuma u autoklavu, temperature i tlaka stvrdnjavanja te viskoznosti smole korištene kao materijal matrice [24]. Utjecaj šupljina u kompozitu pokazuje štetan učinak čak i u kompozitima s niskim

volumnim udjelom vlakna, smanjujući tako (ne samo za ovu vrstu kompozita) savojna, transverzalna i smična svojstva. Uz njihovu pojavu, važnu ulogu igra i oblik šupljine. Šupljine mogu uzrokovati i značajne neelastične deformacije u materijalu, predstavljajući tako uzrok drugim načinima popuštanja.



# 4

## Kriteriji popuštanja

### 4.1 Hashin-ov kriterij popuštanja

Hashinov kriterij popuštanja sastavljen je od kvadratičnih polinoma napreznja te se koristi za kompozite sastavljene od jednosmjernih slojeva. Veličine korištene u polinomima su funkcije invarijanti napreznja za transverzalno izotropnu simetriju. Slijedi da je ravnina poprečnog presjeka jednosmjernog kompozitnog sloja pretpostavljena kao izotropna. Hashin-ov kriterij predlaže popuštanje jednosmjernog kompozitnog sloja na četiri moguća načina: Vlak ( $\sigma_1 > 0$ ) i tlak ( $\sigma_1 < 0$ ) vlakana i vlak ( $\sigma_2 > 0$ ) i tlak ( $\sigma_2 < 0$ ) matrice [24]. Za tanke jednoslojne kompozite kriterij glasi:

$$\begin{aligned} F_f^t &= \left( \frac{\hat{\sigma}_{11}}{X_T} \right)^2 + \alpha \left( \frac{\hat{\tau}_{12}}{S_L} \right)^2, & \hat{\sigma}_{11} &\geq 0, \\ F_f^c &= \left( \frac{\hat{\sigma}_{11}}{X_C} \right)^2, & \hat{\sigma}_{11} &< 0, \\ F_m^t &= \left( \frac{\hat{\sigma}_{22}}{Y_T} \right)^2 + \left( \frac{\hat{\tau}_{12}}{S_L} \right)^2, & \hat{\sigma}_{22} &\geq 0, \\ F_m^c &= \left( \frac{\hat{\sigma}_{22}}{2S_T} \right)^2 + \left[ \left( \frac{Y_C}{2S_T} \right)^2 - 1 \right] \frac{\hat{\sigma}_{22}}{Y_C} + \left( \frac{\hat{\tau}_{12}}{S_L} \right)^2, & \hat{\sigma}_{22} &< 0. \end{aligned} \tag{4.1}$$

U jednadžbi 4.1  $\alpha$  predstavlja koeficijent koji određuje utjecaj smičnog napreznja na kriterij inicijacije vlačnog oštećenja vlakna, a prema [33] iznosi 0, dok iz literature [34] iznosi 1 te će ta vrijednost biti korištena u numeričkim modelima. Veličine  $\hat{\sigma}_{11}$ ,  $\hat{\sigma}_{22}$  i  $\hat{\tau}_{21}$  komponente su tenzora efektivnog napreznja  $\hat{\sigma}$  koji se koristi za evaluaciju kriterija oštećenja, a koji je dobiven iz izraza:

$$\hat{\sigma} = \mathbf{M}\sigma. \tag{4.2}$$

U jednadžbi 4.2  $\mathbf{M}$  je operator oštećenja koji je definiran kao:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \frac{1}{1-d_f} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{1-d_m} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{1-d_s} \end{bmatrix}. \quad (4.3)$$

U izrazu 4.3,  $d_f$ ,  $d_m$  i  $d_s$  unutarnje su varijable (oštećenja) koje opisuju oštećenje vlakna, matrice i smika te koje su derivirane iz varijabli oštećenja  $d_f^t$ ,  $d_f^c$ ,  $d_m^t$ ,  $d_m^c$ , a koje odgovaraju već navedenim načinima popuštanja:

$$d_f = \begin{cases} d_f^t & \hat{\sigma}_{11} \geq 0, \\ d_f^c & \hat{\sigma}_{11} < 0, \end{cases} \quad (4.4)$$

$$d_m = \begin{cases} d_m^t & \hat{\sigma}_{22} \geq 0, \\ d_m^c & \hat{\sigma}_{22} < 0, \end{cases} \quad (4.5)$$

$$d_s = 1 - \left(1 - d_f^t\right) \left(1 - d_f^c\right) \left(1 - d_m^t\right) \left(1 - d_m^c\right). \quad (4.6)$$

Prije pojave oštećenja materijala, operator oštećenja  $\mathbf{M}$  jednak je jediničnoj matrici što znači da vrijedi:  $\hat{\sigma} = \sigma$ . Tek nakon pojave i napredovanja oštećenja u bilo kojem od načina popuštanja, on postaje bitan faktor daljnjoj predikciji oštećenja.

#### 4.1.1 Implementacija u Abaqus/CAE

U pretprocesoru Abaqus/CAE Hashin-ov kriterij popuštanja implementiran je u modulu *Property* u opciji *Material* gdje se zadaju svojstva materijala, među kojima su iznosi čvrstoća i energija loma. Vlačna i tlačna čvrstoća za longitudinalni i transverzalni smjer za vlakna i matricu nalaze se pod opcijom *Hashin Damage* dok se energije loma unose u podopciju *Damage Evolution*. U tablica 4.1 iznesene su izlazne varijable i njihovi puni nazivi na engleskom. HSNFTCART i HSNFCCART izlazne su varijable popuštanja vlakana uslijed vlaka odnosno tlaka, dok su HSNMTCART i HSNMCCART izlazne varijable popuštanja matrice uslijed vlaka tj. tlaka.

Tablica 4.1: Izlazne varijable Hashin-ovog kriterija popuštanja

Izlazna varijabla	Puni naziv varijable na engleskom
HSNFTCART	<i>Hashin's fiber tensile initiation criterion</i>
HSNFCCART	<i>Hashin's fiber compressive initiation criterion</i>
HSNMTCART	<i>Hashin's matrix tensile initiation criterion</i>
HSNMCCART	<i>Hashin's matrix compressive initiation criterion</i>

Hashin-ov model popuštanja također je moguće uvesti i u *Keywords* datoteci.

```
*DAMAGE INITIATION, CRITERION=HASHIN, ALPHA=alpha
X^T, X^C, Y^T, Y^C, S^L, S^T
**
*Damage Evolution, type=ENERGY
G_LT, G_LC, G_TT, G_TC
```

## 4.2 LaRC05 kriterij popuštanja

LaRC05 kriterij popuštanja je trodimenzionalni konsitativni zakon ovisan o tlaku za predviđanje popuštanja kod jednosmjernih višeslojnih kompozita. Kriterij razlikuje načine popuštanja u kompozitu između popuštanja matrice, izvijanja (*eng. kinking*) i loma vlakana i popuštanja vlakana uslijed vlačnog opterećenja. Za popuštanje matrice korištene su *in-situ* čvrstoće. Uslijed propagacije oštećenja, kriterij uzima u obzir brzine oslobađanja energije za pojedine načine popuštanja, dok se za lom matrice u obzir uzima efekt akumulacije pukotina u samom sloju [31].

### 4.2.1 Popuštanje matrice

Popuštanje kompozita uslijed loma matrice veoma je slično popuštanju čistog polimera. U [31] predložen je prilagođeni kriterij popuštanja po uzoru na Mohr-Coulomb kriterij popuštanja za jednosmjerne kompozitne slojeve. Izraz za kriterij popuštanja matrice glasi:

$$FIM = \left( \frac{\tau_T}{S_T^{is} - \eta_T \sigma_N} \right)^2 + \left( \frac{\tau_L}{S_L^{is} - \eta_L \sigma_N} \right)^2 + \left( \frac{\langle \sigma_N \rangle_+}{Y_T^{is}} \right)^2, \quad (4.7)$$

gdje dolazi do popuštanja ukoliko je  $FIM \geq 1$ . Posljednji izraz predstavlja udio trenja u pozitivnom smjeru normale prilikom otvaranja pukotine što znači da je kriterij primjenjiv na tlačno i vlačno popuštanje matrice. Uglate zagrade u posljednjem članu i indeks + predstavljaju Macaulay operator, koji je jednak  $\sigma_N$ , ukoliko je  $\sigma_N$  pozitivna, vlak, odnosno nula ukoliko je  $\sigma_N$  manja od nule, tlak. U jednadžbi 4.7  $\tau_L$ ,  $\tau_T$  i  $\sigma_N$  komponente su trenja u ravnini loma i dobivene su transformacijom naprezanja [31]:

$$\begin{aligned} \sigma_N &= \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} \cos(2\alpha) + \tau_{23} \sin(2\alpha), \\ \tau_T &= -\frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} \sin(2\alpha) + \tau_{23} \cos(2\alpha), \\ \tau_L &= \tau_{12} \cos(\alpha) + \tau_{31} \sin(\alpha). \end{aligned} \quad (4.8)$$

U jednadžbama 4.8 kut  $\alpha$  dobiven je numeričkim razmatranjem funkcije za kutove u rasponu od  $0^\circ$  do  $180^\circ$  te on maksimizira koeficijent  $FI_M$ . Eksperimentalnim postupkom dobiveno je da je za ugljična i staklena vlakna vrijednost  $\alpha_0$  u intervalu  $51^\circ \leq \alpha_0 \leq 55^\circ$ .  $\alpha_0$  materijalno je svojstvo za čisti transverzalni tlak, pa se time može dobiti eksperimentalno [31]. Koeficijenti trenja  $\eta_L$  i  $\eta_T$  uvršteni su u izraz kako bi uzeli u obzir utjecaj tlaka na odziv popuštanja. Oni funkcioniraju na način da u prisutnosti naprezanja povećavaju smične čvrstoće, odnosno smanjuju ih u prisutnosti vlačnog normalnog trenja. Koeficijent  $\eta_T$  dobiven je ispitivanjem čistog transverzalnog tlaka kao funkcija varijable  $\alpha_0$ :

$$\eta_T = -\frac{1}{\tan(2\alpha_0)}. \quad (4.9)$$

Koeficijent  $\eta_L$  materijalno je svojstvo te ga je potrebno izmjeriti eksperimentalno [31]. Kada kompozitna konstrukcija popusti uslijed loma matrice, čvrstoće materijala ovisio debljini sloja kao i o debljini susjednih slojeva u laminatu. Uvjeti za propagaciju mikro pukotina za jednosmjerne kompozite pogodniji su nego za tanke slojeve u višesmjernom laminatu kojima su susjedni slojevi pod  $0^\circ$ . Stoga, debljina sloja i prisutnost susjednih slojeva mijenja rubne uvjete koji se koriste za problem rasta pukotine. Ovi utjecaji uzeti su u obzir za *in-situ* efekte u [31].

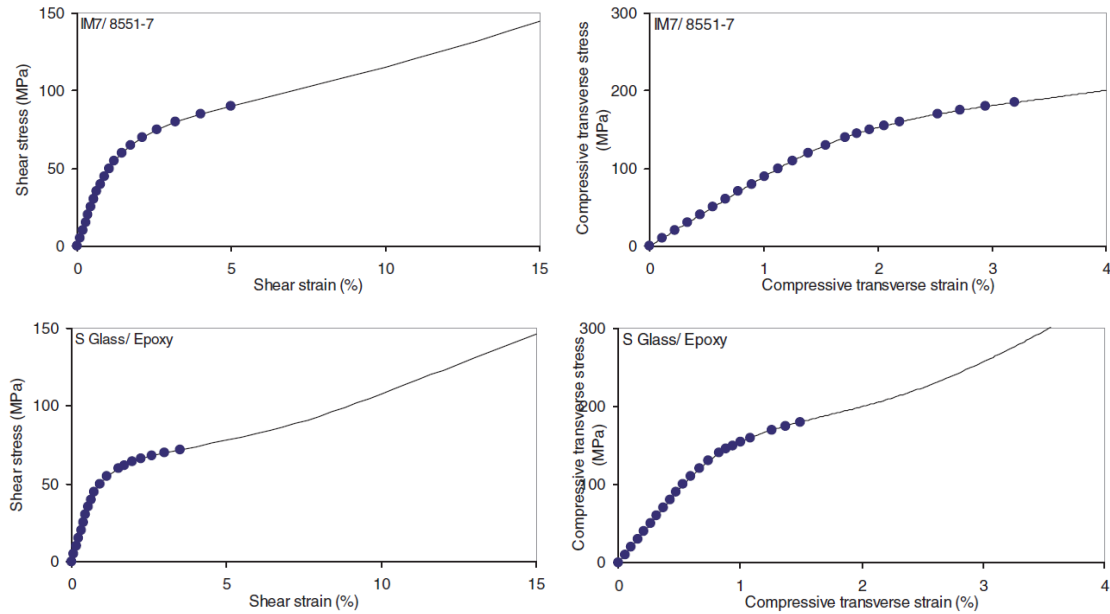
Uvjeti za propagaciju pukotine povezani su s longitudinalnim i transverzalnim kritičnim brzinama oslobađanja energije za načine otvaranja pukotine I i II [31].

$$\begin{aligned} G_{Ic} &= Y \frac{\pi a_0}{m} 4\xi_2(Y_T^{is}), \\ G_{IIc}^L &= Y \frac{\pi a_0}{m} 4\xi_L(Y_L^{is}), \\ G_{IIc}^T &= Y \frac{\pi a_0}{m} 4\xi_T(S_T^{is}). \end{aligned} \quad (4.10)$$

U jednadžbama 4.10 pukotinska žilavost  $G_{Ic}$  predstavlja način otvaranja pukotine I,  $G_{IIc}^L$  i  $G_{IIc}^T$  predstavljaju način otvaranja pukotine II.  $Y$  je koeficijent ovisan o geometriji, a  $m$  iznosi 2 za nestabilnu propagaciju u transverzalnom smjeru ili 4 za nestabilnu propagaciju u longitudinalnom smjeru. Čvrstoća  $Y_T^{is}$  je transverzalna *in-situ* vlačna čvrstoća,  $S_L^{is}$  je *in-situ* longitudinalna smična čvrstoća, dok je  $S_T^{is}$  *in-situ* transverzalna smična čvrstoća. Ove čvrstoće su *in-situ* jer ovise o debljini sloja i lokaciji sloja u kompozitu.  $\xi$  je funkcija koja predstavlja površinu ispod krivulje naprezanja-istezanja do koordinate  $(\varepsilon, \sigma)$ , a definirana je kao:

$$\begin{aligned} \xi_2(\sigma) &= \int_0^{\varepsilon(\sigma)} \sigma_2 d\varepsilon_2, \\ \xi_L(\tau) &= \int_0^{\gamma(\tau)} \tau_L d\gamma_L, \\ \xi_T(\tau) &= \int_0^{\gamma(\tau)} \tau_T d\gamma_T. \end{aligned} \quad (4.11)$$

Funkcija  $\xi_2(\sigma)$  dobivena je iz standardnog vlačnog ispitivanja,  $\xi_L(\tau)$  iz longitudinalnog smičnog ispitivanja, a  $\xi_T(\tau)$  iz transverzalnog tlačnog testa [31]. Funkcije nisu dobivene izravno kroz ispitivanja već su interpolirane i ekstrapolirane *spline* krivuljama kao na slici 4.1.



Slika 4.1: Ekstrapolirane krivulje za longitudinalno i transverzalno tlačno stanje naprezanja za dva različita kompozita [31]

#### 4.2.2 Popuštanje uslijed izvijanja vlakna

Kriterij kojeg autori iz [31] predlažu jednak je za lom i izvijanje vlakna te glasi:

$$FI_{KINK} = FI_{SPLIT} = \left( \frac{\tau_{23}^m}{S_T^{is} - \eta_T \sigma_2^m} \right)^2 + \left( \frac{\tau_{12}^m}{S_L^{is} - \eta_L \sigma_2^m} \right)^2 + \left( \frac{\langle \sigma_2^m \rangle_+}{Y_T^{is}} \right)^2. \quad (4.12)$$

Kako ovaj kriterij razlikuje dva načina popuštanja on zapravo ovisi o iznosu tlaka u smjeru vlakna. Ako je  $\sigma_1 \leq -X_C/2$  to znači da dolazi do izvijanje vlakna, dok slučaj  $\sigma_1 \geq -X_C/2$  ukazuje na lom vlakna [31]. Predloženi kriterij također dobro aproksimira utjecaj proizvodnih defekata u materijalu [35]. Relevantne jednačbe rotacija za naprezanja u ravnini pojasa izvijanja glase [31]:

$$\begin{aligned} \sigma_2^\psi &= \cos^2 \psi \sigma_2 + \sin^2 \psi \sigma_3 + 2 \sin \psi \cos \psi \tau_{23}, \\ \tau_{12}^\psi &= \tau_{12} \cos \psi + \tau_{31} \sin \psi, \\ \tau_{23}^\psi &= -\sin \psi \cos \psi \sigma_2 + \sin \psi \cos \psi \sigma_3 + (\cos^2 \psi - \sin^2 \psi) \tau_{23}, \\ \tau_{31}^\psi &= \tau_{31} \cos \psi - \tau_{12} \sin \psi. \end{aligned} \quad (4.13)$$

Za naknadnu rotaciju do ravnine neusklađenosti koriste se izrazi [31]:

$$\begin{aligned}\sigma_2^m &= \sin^2 \varphi \sigma_1 + \cos^2 \varphi \sigma_2^\psi - 2 \sin \varphi \cos \varphi \tau_{12}^\psi, \\ \tau_{12}^m &= -\sin \varphi \cos \varphi \sigma_1 + \sin \varphi \cos \varphi \sigma_2^\psi + (\cos^2 \varphi - \sin^2 \varphi) \tau_{12}^\psi, \\ \tau_{23}^m &= \tau_{23}^\psi \cos \varphi - \tau_{31}^\psi \sin \varphi.\end{aligned}\quad (4.14)$$

Kut ravnine neusklađenosti  $\psi$  dobiven je numerički u rasponu od  $0^\circ$  do  $180^\circ$  kako bi se dobila maksimalna vrijednost koeficijenta popuštanja u jednadžbi 4.12. Kut  $\varphi$  suma je početnog kuta neusklađenosti i smične deformacije  $\gamma_{m^0}$  [31]

$$\varphi = \text{sign}(\tau_{12}^\psi) \varphi^0 + \gamma_{m^0}, \quad (4.15)$$

gdje je  $\gamma_{m^0}$  funkcija s varijablom  $\tau_{m^0}$ :

$$\gamma_{m^0} = \gamma(\tau_{m^0}). \quad (4.16)$$

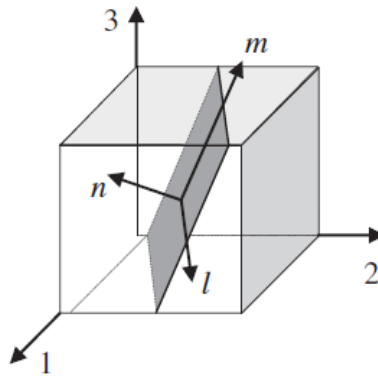
Kut  $\varphi^0$  materijalno je svojstvo koje se dobije iz longitudinalne tlačne čvrstoće iterativnom jednadžbom 4.17

$$\varphi^0 = \varphi^c - \gamma \left( \frac{1}{2} \sin(2\varphi^0) X_C \right), \quad (4.17)$$

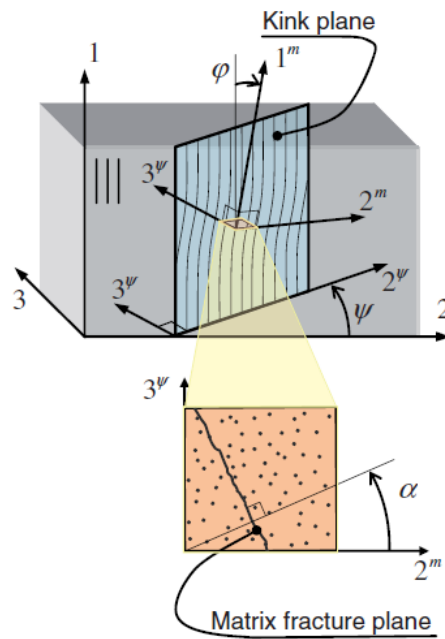
gdje je  $\varphi^c$  definiran u [36] i [31] kao:

$$\varphi^c = \arctan \left( \frac{1 - \sqrt{1 - 4 \left( \frac{S_L}{X_C} + \eta_L \right) \frac{S_L}{X_C}}}{2 \left( \frac{S_L}{X_C} + \eta_L \right)} \right). \quad (4.18)$$

Koordinatni sustav u ravnini pukotine s pripadajućim oznakama osi, te kutovi  $\varphi$ ,  $\psi$  i ravnina izvijanja prikazani su na slikama 4.2 tj. 4.3.



Slika 4.2: Koordinatni sustav u ravnini pukotine [31]



Slika 4.3: Model formacije pojasa izvijanja [31]

### 4.2.3 Popuštanje vlakna uslijed vlačnog opterećenja

S obzirom da se kriterij maksimalnog napreznja dobro poklapa s eksperimentalnim podacima, za vlačno opterećenje vlakana u LaRC05 kriteriju koristi se indeks popuštanja [31]:

$$FI_{FT} = \frac{\langle \sigma_1 \rangle_+}{X_T}. \quad (4.19)$$

### 4.2.4 Propagacija oštećenja

U trenutku kada bilo koji indeks kriterija popuštanja dosegne vrijednost 1, konstitutivni zakoni se prilagođavaju kako bi simulirali formaciju i propagaciju pukotina tj. oštećenja u kompozitnom dijelu. Za svaki način popuštanja propagacija oštećenja djeluje drugačije, no koristi se zajednički pristup a on je takav da se komponente napreznja koje djeluju na predviđenu ravninu oštećenja (pukotine) linearno smanje na nulu [31]. Smanjenje trenja provodi se na način da je disipacija energije predviđene modelom po jedinici površine jednaka žilavosti loma materijala za dotični način popuštanja [31]. Napreznja koja djeluju u trenutku propagacije oštećenja dijele se na [31] efektivna napreznja, odnosno napreznja koja djeluju na efektivnu površinu materijala koja se odupire propagaciji pukotine/oštećenja; i nominalna napreznja tj. stvarna napreznja koja se javljaju na materijalu, i koja ovise o oštećenju.

Tenzor naprezanja u materijalnom koordinatnom sustavu transformira se u koordinatni sustav ravnine oštećenja (slika 4.2).  $\bar{\sigma}_{123}$  stoga postaje  $\bar{\sigma}_{lmn} = \{\sigma_m \ \sigma_m \ \sigma_n \tau_{lm} \tau_{mn} \tau_{nl}\}^T$ , dok je efektivni vektor naprezanja  $\mathbf{t} = \{\sigma_n \ \tau_{mn} \ \tau_{nl}\}^T$ .

Simulacija oštećenja i pukotine postiže se degradacijom komponenata naprezanja na način da je nominalno naprezanje definirano kao [31]:

$$\mathbf{t} = \left\{ \left( 1 - d \frac{\langle \sigma_n \rangle_+}{\sigma_n} \right) \sigma_n \ (1-d)\tau_{mn} \ (1-d)\tau_{nl} \right\}^T. \quad (4.20)$$

Nominalna naprezanja u koordinatnom sustavu ravnine loma jednaka su [31]:

$$\sigma_{lmn} = \left\{ \sigma_l \ \sigma_m \ \left( 1 - d \frac{\langle \sigma_n \rangle_+}{\sigma_n} \right) \sigma_n \ \tau_{lm} \ (1-d)\tau_{mn} \ (1-d)\tau_{nl} \right\}^T. \quad (4.21)$$

Vektor nominalnog naprezanja je potom ponovno transformiran u ravninu materijalnog koordinatnog sustava.

Disipacija energije prilikom propagacije oštećenja/pukotine određuje se razvojem koeficijenta oštećenja  $d$ . Kako bi se procijenila ta energija, neelastični članovi tenzora deformacije prilikom popuštanja uklonjeni su iz ukupne deformacije. Potom slijedi da je elastična deformacija u materijalnom koordinatnom sustavu [31]:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{123}^{el} = \mathbf{D}^{el-1} \bar{\sigma}_{123}. \quad (4.22)$$

Matrica  $\mathbf{D}^{el}$  u jednadžbi 4.22 predstavlja matricu elastičnosti i ne uzima u obzir popuštanje modula elastičnosti, ali uzima u obzir utjecaj hidrostatskog tlaka [31].

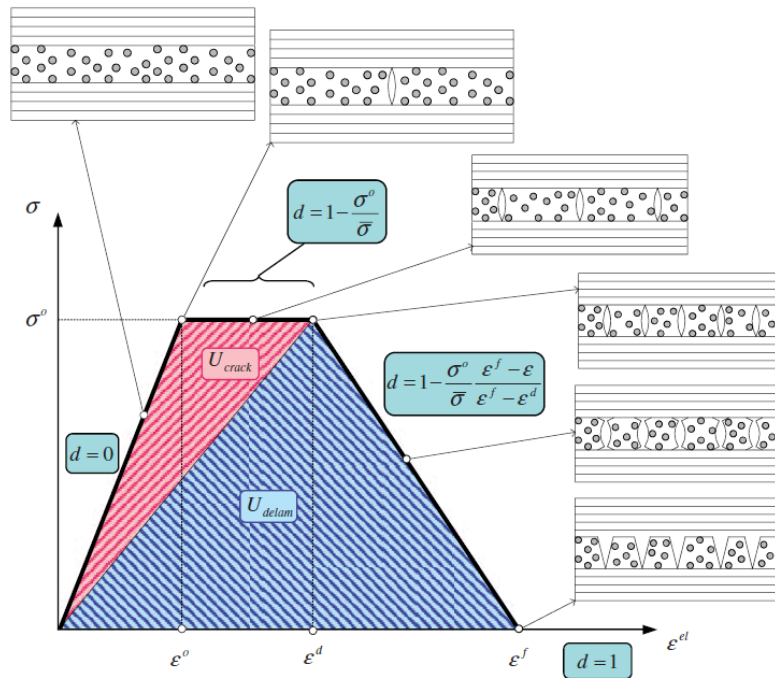
Ako su degradirane samo komponente vektora naprezanja, disipirana energija računa se unutarnjim umnoškom vektora elastične deformacije u ravnini loma, označenog kao  $\{\varepsilon_n^{el} \ \gamma_{mn}^{el} \ \gamma_{nl}^{el}\}^T$  i vektora naprezanja  $\mathbf{t}$ . Ovaj proces može se opisati kao projiciranje vektora elastične deformacije u ravnini loma u smjeru vektora naprezanja, te množenjem iznosa projiciranog vektora deformacije, označenog kao  $\varepsilon_{el}$ , s iznosom nominalnog vektora naprezanja,  $\sigma$ . Iz toga je jasno da su  $\sigma$  i  $\varepsilon^{el}$  radno-konjugirani, a energija disipirana po jedinici volumena tijekom loma odgovara površini ispod krivulje  $(\varepsilon^{el}, \sigma)$ . Parametar oštećenja  $d$  definiran je za svaki način popuštanja kao funkcija  $\varepsilon^{el}$  i iznosa efektivnog vektora naprezanja,  $\bar{\sigma}$ , na način da apsorbirana energija tijekom loma odgovara žilavosti loma za odgovarajući način popuštanja [31].

### Popuštanje matrice

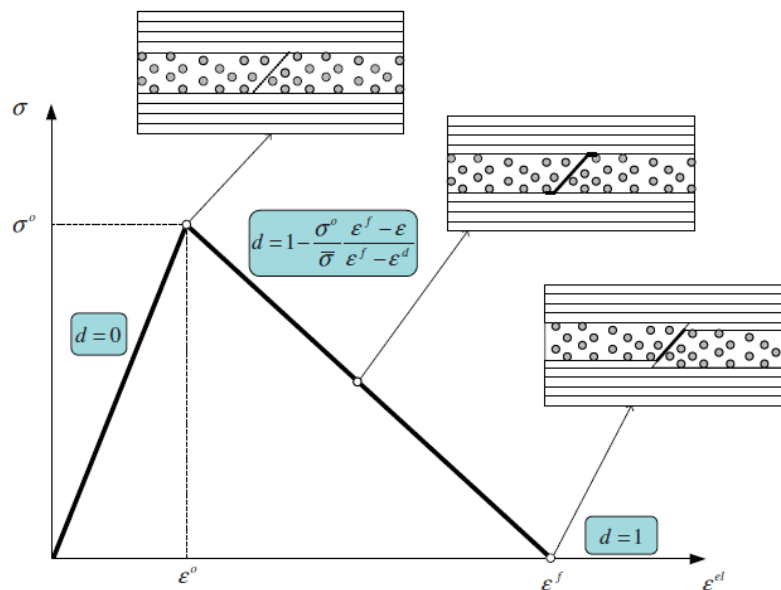
Za kompozitni laminat, propagacija oštećenja ovisi o kutu pukotine  $\alpha$  i lokaciji sloja unutar laminata (sloj u jednosmjernom laminatu, unutarnji sloj (*eng. embedded*) i vanjski sloj).



Ako je  $\alpha = 0$ , nakon formiranja prve pukotine slijedi formacija narednih pukotina sve dok ne dođe do delaminacije kao što je prikazano na slici 4.4. Razina zasićenja pukotina dobiva se eksperimentalno ili kroz *shear lag* model [31]. Drugi slučaj, kada je  $\alpha \neq 0$ , i koji nastaje tijekom tlačnog opterećenja, dovodi do pojave klina koji zatim uzrokuje delaminaciju. Slučaj  $\alpha \neq 0$  prikazan je na slici 4.5



Slika 4.4: Propagacija pukotine za  $\alpha = 0$  [31]



Slika 4.5: Propagacija pukotine za  $\alpha \neq 0$  [31]

### Višesmjerni laminati s kutom loma $\alpha = 0$

#### Unutarnji slojevi

Unatoč pojavi pukotine u matrici kompozita pri  $\alpha = 0$ , naprezanja se i dalje mogu prenijeti na oštećeni sloj pomoću smičnog djelovanja susjednih slojeva. To rezultira smanjenjem utjecaja pukotine na polje naprezanja na relativno malim udaljenostima od pukotine i kasnijim stvaranjem dodatnih pukotina [31]. Uslijed stvaranja ovih pukotina, pretpostavlja se da nominalna naprezanja ostaju konstantna unatoč porastu deformacije u kompozitu. Zasićenjem pukotina, njihova međusobna udaljenost postaje premala za prijenos naprezanja [31]. Koeficijent zasićenja pukotina glasi [31]:

$$n = \frac{S_L^{is}}{hY_T^{is}}, \quad (4.23)$$

gdje je  $h$  ukupna debljina svih međusobno spojenih slojeva iste orijentacije. Utrošena energija po volumenu uslijed stvaranja pukotina jednaka je [31]:

$$U_{crack} = 0,5\sigma^0 (\varepsilon^d - \varepsilon^0). \quad (4.24)$$

Energija u jednadžbi 4.24 prikazana je crvenom šrafurom na slici 4.4. Energija potrebna za formaciju novih pukotina je [31]:

$$nVG_c, \quad (4.25)$$

gdje  $G_c$  označava kritičnu energiju loma.

Deformacija  $\varepsilon^d$  na početku procesa delaminacije jednaka je [31]:

$$\varepsilon^d = \varepsilon^0 + \frac{2nG_c}{\sigma^0}, \quad (4.26)$$

u kojoj  $\sigma^0$  predstavlja iznos naprezanja u trenutku popuštanja. Kada je postignuta deformacija jednaka iznosu  $\varepsilon^0$ , daljnje povećanje opterećenja dovodi do delaminacije u kompozitu. Izgubljena energija tijekom delaminacije prikazana je na slici 4.4 plavom šrafurom i jednaka je [31]:

$$U_{delam} = 0,5\sigma^0 \varepsilon^f. \quad (4.27)$$

S obzirom da bi energija utrošena prilikom delaminacije trebala biti površina delaminacije pomnožena sa interlaminarnom brzinom oslobađanja energije  $G_{IIc}$ , slijedi da izraz za  $\varepsilon^f$  postaje [31]:

$$\varepsilon^f = \frac{2G_{IIc}}{\sigma^0 t}, \quad (4.28)$$

u kojoj je  $t$  debljina elementa.

U svrhe prikaza  $\sigma, \varepsilon$  dijagrama parametar  $d$  određen je kao maksimalna vrijednost u

vremenu [31]:

$$d^{inst} = \max \left\{ 0, \min \left\{ 1 - \frac{\sigma^0}{\bar{\sigma}}, 1 - \frac{\sigma^0}{\bar{\sigma}} \frac{\varepsilon^f - \varepsilon^{el}}{\varepsilon^f - \varepsilon^d}, 1 \right\} \right\}, d = \max_{time} \{d^{inst}\}. \quad (4.29)$$

### Vanjski slojevi

Kako naprezanje na vanjske slojeve može doći samo s jedne strane sloja, koncentracija pukotina jednaka je polovini koncentracije za unutarnje slojeve [31]:

$$n = \frac{S_L^{is}}{2hY_T^{is}}. \quad (4.30)$$

Propagacija oštećenja razmatra se na isti način kao i za unutarnje slojeve

### Višesmjerni laminati s kutom loma $\alpha \neq 0$

Efekt klina potiče delaminaciju kada su u pitanju višesmjerni laminati s kutom loma različitim od nula. Energija po jedinici volumena utrošena po ovom modelu oštećenja iznosi  $0,5\sigma^0\varepsilon^f$ . Energija utrošena za propagaciju pukotine jednaka je površini loma pomnoženom s kritičnom brzinom oslobađanja energije za pojedini način otvaranja pukotine [31]. Slijedi da je  $\varepsilon^f$  [31]:

$$\varepsilon^f = 2 \frac{G_c/L + G_{Ic}/t}{\sigma^0}. \quad (4.31)$$

U jednadžbi 4.31, veličina  $L$  označava omjer volumena konačnog elementa i površine pukotine [31]. Za prikaz krivulje  $\sigma, \varepsilon$  parametar oštećenja  $d$  određuje se kao i u jednadžbi 4.29:

$$d^{inst} = \max \left\{ 0, \min \left\{ 1 - \frac{\sigma^0}{\bar{\sigma}}, 1 - \frac{\sigma^0}{\bar{\sigma}} \frac{\varepsilon^f - \varepsilon^{el}}{\varepsilon^f - \varepsilon^d}, 1 \right\} \right\}, d = \max_{time} \{d^{inst}\}. \quad (4.32)$$

### Jednosmjerni laminati

Kada su u pitanju jednosmjerni višeslojni kompoziti, ne postoji akumulacija pukotina. S obzirom na to, varijabla oštećenja definirana je u jednadžbi 4.32, a izraz za  $\varepsilon^f$  glasi [31]:

$$\varepsilon^f = 2 \frac{G_c/L}{\sigma^0}. \quad (4.33)$$

## 4.2.5 Implementacija u Abaqus/CAE

U pretprocesoru Abaqus/CAE kriterij LaRC05 implementiran je tek 2023. godine, te ga je do tada (od 2017. godine) bilo potrebno definirati u *Keywords* datoteci. Za definiciju ovog kriterija potrebne su vlačne i tlačne čvrstoće u smjeru i okomito na smjer vlakna ( $X_T, X_C,$

$Y_T, Y_C$ ), smična čvrstoća ( $S_L$ ), kut ravnine pukotine ( $\alpha_0$ ), kut neusklađenosti ( $\varphi_0$ ) i uzdužni i transverzalni koeficijenti trenja ( $\eta_L, \eta_T$ ). Prilikom unosa energija loma važno je obratiti pažnju na indeks koji označava pojedini način popuštanja gdje vrijedi pravilo indeksiranja objašnjeno u tablici 4.2.

Tablica 4.2: Indeksi i odgovarajući načini popuštanja

Indeks	Način popuštanja
1	Lom matrice
2	Izvijanje vlakna
3	Lom vlakna
4	Vlačno popuštanje vlakna

Tablica 4.3: Izlazne varijable LaRC05 kriterija popuštanja

Izlazna varijabla	Puni naziv varijable na engleskom
LARCMCCRT	<i>LaRC05 matrix cracking damage initiation criterion</i>
LARCFKCRT	<i>LaRC05 fiber kinking damage initiation criterion</i>
LARCFSCRT	<i>LaRC05 fiber splitting damage initiation criterion</i>
LARCFTCRT	<i>LaRC05 fiber tensile damage initiation criterion</i>

U *Keywords* datoteci LaRC05 kriterij definira se pomoću iznosa čvrstoće, uzdužnog i poprečnog koeficijenta trenja, te kutova ravnine pukotine i neusklađenosti, a primjer je prikazan ispod.

```
*DAMAGE INITIATION, CRITERION=LaRC05
X_T, X_C, Y_T, Y_C, S_L, alpha_0, phi_0, S_T,
eta_L, eta_T
**
*DAMAGE EVOLUTION, TYPE=ENERGY, failure index=1,2,3,4
G_FRAC
```

# Modeliranje diskontinuiteta pomoću XFEM-a

# 5

XFEM (eng. *Extended Finite Element Method*) numerička je metoda modeliranja diskontinuiteta ili singulariteta unutar mreže konačnih elemenata. XFEM proširuje klasične konačne elemente "obogaćivanjem" stupnjeva slobode elemenata koji se nalaze na diskontinuitetu pomoću koncepta podjele cjeline. Velika prednost XFEM-a je da prilikom propagacije pukotine, nije potrebna ručna prilagodba mreže konačnih elemenata [37].

## 5.1 Funkcije obogaćivanja čvorova

Za modeliranje stacionarnih pukotina uvode se funkcije obogaćivanja čvorova (eng. *Nodal Enrichment Functions*). Te funkcije se sastoje od asimptotskih funkcija koje opisuju singularitet u vrhu pukotine i diskontinuiranih funkcija koje predstavljaju skok u pomaku po plohama pukotine. Vektor pomaka  $\mathbf{u}$  s funkcijama obogaćivanja glasi:

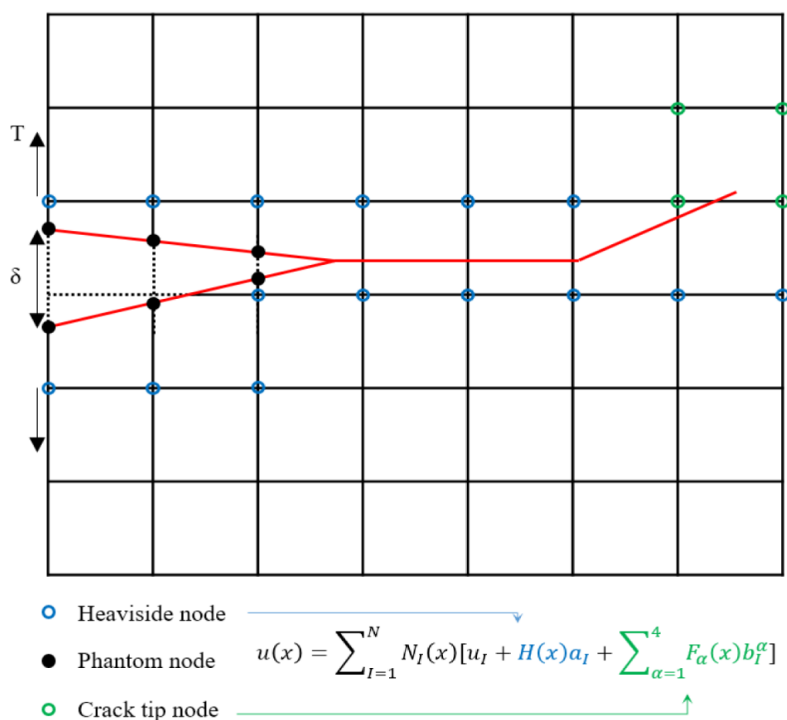
$$\mathbf{u} = \sum_{I=1}^N N_I(x) \left[ \mathbf{u}_I + H(x)\mathbf{a}_I + \sum_{\alpha=1}^4 F_{\alpha}(x)\mathbf{b}_I^{\alpha} \right]. \quad (5.1)$$

U jednadžbi 5.1,  $N_I(x)$  predstavlja funkcije obogaćivanja čvorova,  $\mathbf{u}_I$  predstavlja kontinuirani pomak numeričkog rješenja, drugi član produkt je vektora čvornog obogaćivanja stupnja slobode  $\mathbf{a}_I$  i pridružene diskontinuitetne funkcije  $H(\mathbf{x})$ , a treći član je produkt vektora obogaćenog stupnja slobode  $\mathbf{b}_I^{\alpha}$  i asimptotske funkcije izražene kao  $F_{\alpha}(x)$ .

## 5.2 Metoda kohezivnih segmenata i fantomski čvorovi

Za razliku od stacionarnih, propagirajuće pukotine modeliraju se kohezivnim pristupom. Ovaj pristup može modelirati i inicijaciju i propagaciju pukotine. U usporedbi s nekim drugim pristupima poput onih na osnovi kohezivnih elemenata ili površina, ovdje nije potrebno unaprijed odrediti put propagacije pukotine niz granice konačnih elemenata već pukotina može propagirati proizvoljnom putanjom unutar materijala. U ovom slučaju nije

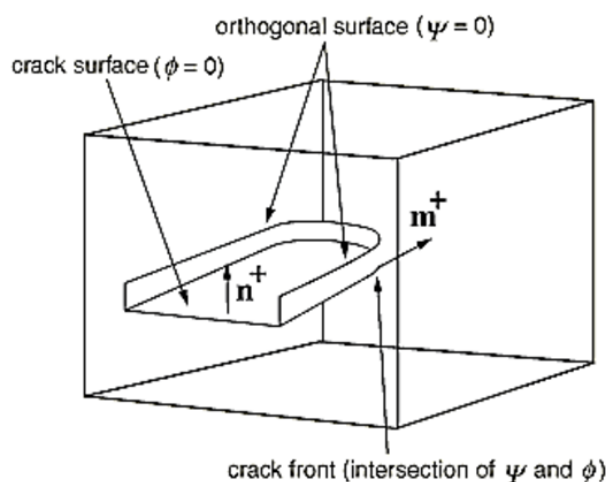
potrebno modeliranje vršnog singulariteta jer se u obzir uzima skok u pomaku niz površinu raspolovljenog elementa što znači da pukotina može propagirati samo kroz jedan element po inkrementu čime se izbjegava potreba za opisivanjem singulariteta. Fantomski čvorovi, koji su superponirani nad stvarnim čvorovima kada je element čitav, uvedeni su u mrežu pri prolasku pukotine kroz element kojem pripadaju. Ovisno o orijentaciji pukotine, ona može biti opisana i kombinacijom stvarnih i fantomskih čvorova. Nakon prolaska pukotine kroz element, stvarni čvor i njemu pripadajući fantomski čvor mogu se kretati nezavisno jedan o drugome [37].



Slika 5.1: Obogaćena mreža konačnih elemenata [38]

### 5.3 Metoda nivo skupa

Opisivanje geometrije pukotine vrši se metodom nivo skupa. Ova numerička metoda koja služi analiziranju i proračunu gibanja fronte vrlo se lako uklapa u proširenu metodu konačnih elemenata. Ovdje je pukotina opisana sa dvije ortogonalne funkcije  $\Phi$  i  $\Psi$ . Metoda nivo skupa provodi proračun krivulja i ploha u fiksnom koordinatnom sustavu bez potrebe za parametrizacijom, a olakšava proračun na oblicima s oštrim kutovima i oblicima koji mjenjaju topologiju.



Slika 5.2: Trodimenzionalna pukotina opisana s dvije funkcije  $\Phi$  i  $\Psi$  [39]

## 5.4 Implementacija u Abaqus FEA

Korištenje XFEM-a u programskom paketu Abaqus FEA osniva se na definiranju obogaćene zone geometrije u kojoj će se nalaziti stacionarna ili propagirajuća pukotina. Ova obogaćena zona definira se pomoću *set-a* tj. geometrijskog skupa u kojem se želi analizirati efekt pukotine na model. Generalno pravilo je da se obogaćena zona definira samo na onom djelu geometrije gdje se očekuje nastanak oštećenja kako bi se smanjili potrebni računalni resursi. Obogaćena zona može modelirati ili stacionarnu ili propagirajuću pukotinu, ali ne i oboje. Za stacionarnu pukotinu potrebno je još definirati i lokaciju inicijalne pukotine, u obliku linije ili površine, ovisno radi li se o analizi 2D ili 3D geometrije. XFEM u pravilu ne dopušta paralelno širenje pukotina u jednoj obogaćenoj zoni, već ukoliko je to potrebno, kao npr. u ploči s otvorom gdje se očekuju pukotine na simetrično suprotnim dijelovima, mora se definirati više obogaćenih zona čiji broj ovisi o broju očekivanih pukotina [37]. Pukotina se opisuje čvornim vrijednostima funkcija nivo skupova i vrijedi uvjet da svaka funkcija nivo skupa za proizvoljni čvor mora imati jedinstvenu vrijednost, što znači da ovaj uvjet nije zadovoljen ukoliko više pukotina uđe u isti element ili susjedni element s pripadajućim čvorovima, što prekida simulaciju s greškom sukoba nivo skupa (eng. *level set conflict*). Kako bi se izbjegla ova greška inicijacija pukotine generalno prati sljedeća pravila [37]:

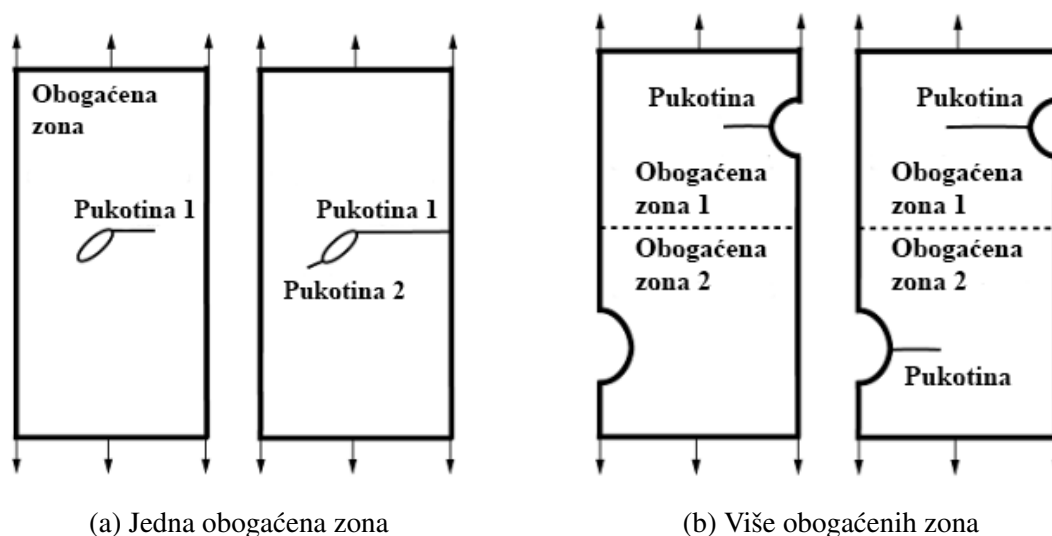
- a) druga pukotina će nastati tek nakon što prva pukotina propagira kroz cijelu obogaćenu zonu
- b) inicijacija pukotine ne može nastati u blizini već postojeće pukotine

- c) pukotina može nastati na neodređenoj lokaciji u geometriji ukoliko dva ili više susjedna elementa zadovoljavaju kriterij popuštanja u istom vremenskom inkreментu
- d) novonastala pukotina ne može ući u već oštećeni element.

XFEM u programskom paketu Abaqus FEA podržava korištenje sljedećih elemenata:

- a) 2D elementi:
  - CPE4, CPE4R, CPE8, CPE8R, CPS4, CPS4R, CPS8, CPS8R, CAX4, CAX4R, CAX8, CAX8R
- b) 3D elementi:
  - C3D8, C3D8R, C3D10, C3D20, C3D20R.

Više pukotina može nastati u jednoj obogaćenoj zoni ali u različitim vremenskim inkreментima i lokacijama i prije nego što prva pukotina propagira kroz cijelu obogaćenu zonu.



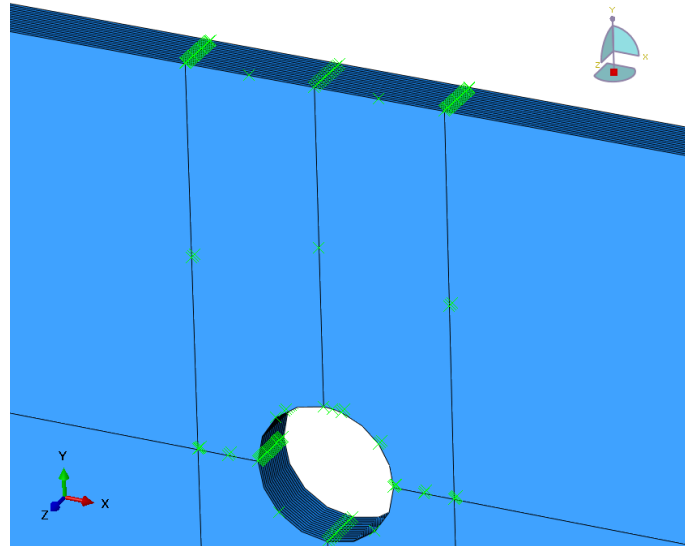
Slika 5.3: Propagacija pukotine/a kroz obogaćenu zonu/e [37]

#### 5.4.1 XFEM u pretprocesoru Abaqus/CAE

U Abaqus/CAE obogaćena zona definira se u modulu *Interaction* s podopcijom *Special* gdje se odabire *Crack* i potom XFEM opcija. U prozoru *Edit Crack* moguće je definirati i interakciju ploha oštećenog elementa pomoću opcije *Contact Property*.



Na slici 5.4 zeleni X simboli označavaju obogaćenu zonu geometrije. U ovom slučaju geometrija je podijeljena tako da bi se moglo definirati više obogaćenih zona.



Slika 5.4: Obogaćena zona geometrije ispitnog uzorka

U *Keywords* datoteci, XFEM se zadaje opcijom *\*ENRICHMENT* a primjer koji je napisan ispod modelira propagirajuću pukotinu XFEM metodom kohezivnih segmenata i inicijalnom geometrijom pukotine.

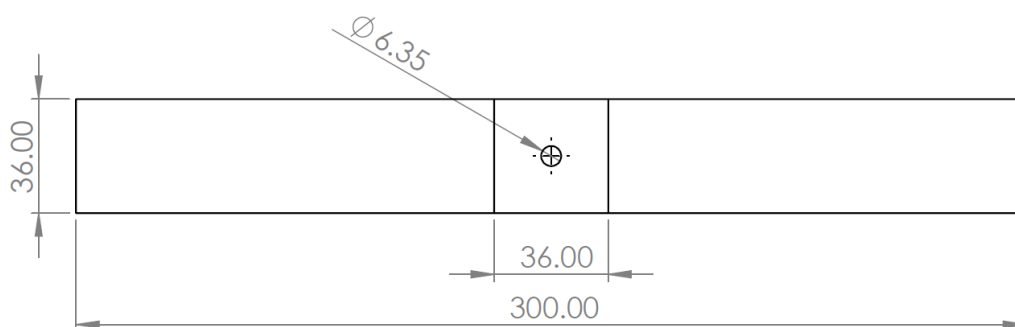
```
ENRICHMENT, TYPE=PROPAGATION CRACK, ELSET=ENRICHED,  
NAME=ENRICHMENT, INTERACTION=INTERACTION  
SURFACE, TYPE=XFEM, NAME=SURF_NAME  
Data lines to specify the names of enriched features  
MATERIAL, NAME=STEEL1  
...  
ENRICHMENT ACTIVATION, TYPE=PROPAGATION CRACK,  
NAME=ENRICHMENT, ACTIVATE=OFF
```

# 6

## Numerički modeli

### 6.1 Validacijski model

Za validaciju numeričkog modela koristi se epruveta dimenzija 300 x 32 x 2,48 mm s otvorom promjera 6,35 mm. Eksperimentalni rezultati dobiveni su postupkom određenim normom ASTM D5766-02 [40]. Dimenzije epruvete prikazane su na slici 6.1 i izražene u milimetrima.



Slika 6.1: Dimenzije testnog uzorka, [mm]

Materijal korišten u eksperimentalnom i numeričkom postupku je CCF800/AC531 kompozit s ugljičnim vlaknima i epoksidnom matricom te rasporedom slojeva  $[45/0/-45/90]_{2s}$  debljine sloja 0,155 mm. Svojstva materijala uzeta su iz [41], a vrijednosti potrebne za definiranje LaRC05 kriterija iz [31]. Svojstva materijala CCF800/AC531 korištena tijekom provedbe numeričkih simulacija iznesena su u tablici 6.1. U radu [41] iz kojeg su uzeti eksperimentalni rezultati za usporedbu, u numeričkom modelu autor je definirao interlaminarna svojstva kako bi se promotrio utjecaj delaminacije, što za model napravljen u svrhe ovog rada nije slučaj kako bi simulacije trajale kraće zbog ograničenih računalnih resursa. Uvođenje interlaminarnih svojstava produjilo bi tijekom trajanja simulacije u Abaqus/Standard solveru za više od 90 puta, gdje bi simulacija s interlaminarnim

svojstvima trajala 16 sati a ona bez, svega 10 minuta.

Tablica 6.1: Svojstva materijala CCF800/AC531 [41][31]

Veličina	Oznaka	Iznos	Mjerna jedinica
Gustoća	$\rho$	1600	kg/m <sup>3</sup>
Moduli elastičnosti	$E_1$	163,8	GPa
	$E_2$	8,63	
	$E_3$	8,63	
Modul smičnosti	$G_{12} = G_{13} = G_{23}$	4,12	GPa
Poissonov koeficijent	$\nu_{12} = \nu_{13}$	0,31	-
	$\nu_{23}$	0,35	
Vlačna čvrstoća u smjeru vlakna	$X_T$	2209	MPa
Tlačna čvrstoća u smjeru vlakna	$X_C$	1052	MPa
Vlačna čvrstoća okomito na smjer vlakna	$Y_T$	70	MPa
Tlačna čvrstoća okomito na smjer vlakna	$Y_C$	199	MPa
Smična čvrstoća	$S_{12} = S_{13}$	131	MPa
	$S_{23}$	75	
Kut ravnine pukotine	$\alpha_0$	53	°
Kut neusklađenosti	$\varphi$	1	°
Koeficijent trenja u uzdužnom smjeru	$\eta_L$	0,082	-
Koeficijent trenja u poprečnom smjeru	$\eta_T$	0,29	-

Kako bi se umanjilo oštećenje na mjestu dodira s klještim kidalice tijekom eksperimenta, krajevi epruvete obloženi su dodatnim epoksidnim pločama. Ti krajevi epruvete u FEM modelu imaju dodijeljen materijal sa samo elastičnim svojstvima što ubrzava vrijeme simulacije. Energije loma Hashin-ovog modela oštećivanja iznesene su u tablici 6.2.

Tablica 6.2: Energije loma za Hashin-ov kriterij [42]

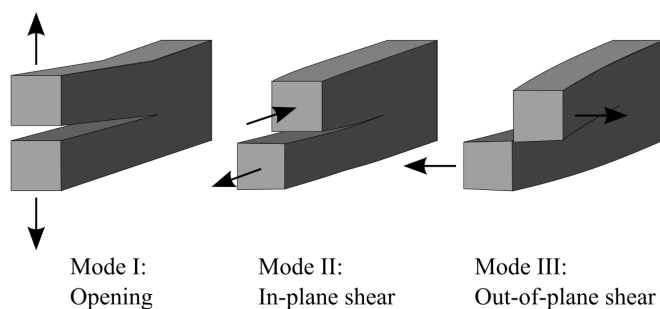
	Oznaka	Iznos	Mjerna jedinica
Vlačna energija loma	$G_{LT}$	80	kJ/m <sup>2</sup>
Tlačna energija loma	$G_{LC}$	100	
Vlačna energija loma	$G_{TT}$	0,1	
Tlačna energija loma	$G_{TC}$	0,1	

Energije loma za Hashin-ov i LaRC05 kriterij razlikuju se po tome što opisuju različite načine inicijacije oštećenja, tj. one načine popuštanja koje kriterij opisuje. Lom matrice u LaRC05 kriteriju izražen je preko Benzegagh-Kenane kriterija loma s eksponentom  $\eta = 2$ , a razaznaje tri načina otvaranja pukotine. Energije loma za LaRC05 model oštećivanja nalaze se u tablici 6.3

Tablica 6.3: Energije loma za LaRC05 kriterij [41][31]

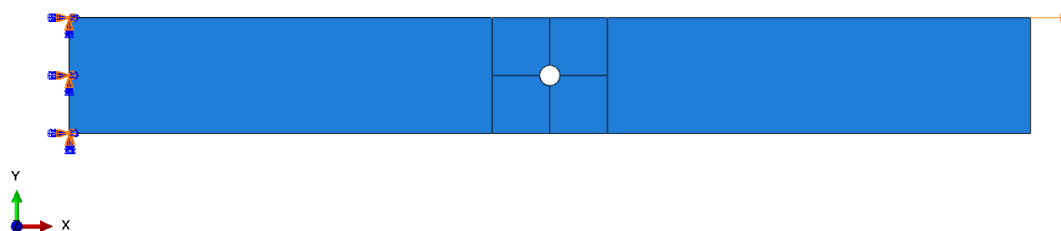
	Oznaka	Iznos	Mjerna jedinica
Energija loma za materijal matrice	$G_{Ic}$ (Način I)	0,21	kJ/m <sup>2</sup>
	$G_{IIc}$ (Način II i III)	0,8	
Energija loma za materijal vlakna	$G_{Ic}$ (kink)	80	
	$G_{Ic}$ (split)	25	
	$G_{Ic}$ (vlak)	92	

Tri načina otvaranja pukotine koja opisuju energije loma u tablici 6.3 prikazani su na slici 6.2. Prvi način je otvaranje pukotine u smjeru normale na površine pukotine, drugi u smičnom smjeru uzdužno na otvor pukotine, a treći ima smjer poprečno na površine pukotine.



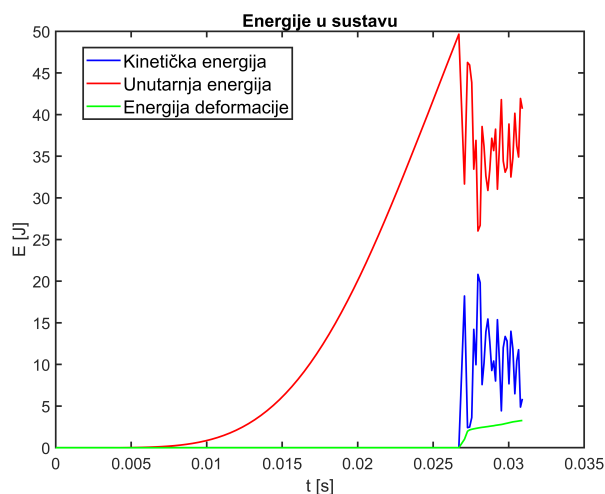
Slika 6.2: Tri načina otvaranja pukotine

Kako je vidljivo na slici 6.3, na jedan kraj epruvete postavljeno je uklještenje, dok je na drugom primijenjen pomak čija amplituda ovisi provodi li se simulacija u Abaqus/Standard ili Abaqus/Explicit solveru. Pomak je definiran u jednom čvoru, na slici 6.3 desno gore, koji je *Equation Constraint* opcijom vezan za sve ostale čvoveve na toj stranici epruvete u smjeru  $x$  osi. Ovakvo zadavanje pomaka olakšava ekstrapoliranje rezultata i izradu traženih dijagrama. Uklještenje se na slici 6.3 nalazi na lijevom rubu epruvete.



Slika 6.3: Rubni uvjeti epruvete

U Abaqus/Standard-u pomak je linearan, dok je zbog efekta inercijskih sila, i da bi simulacija bila kvazi-statička, u Abaqus/Explicit-u pomak definiran kao *smooth step*. Drugi uvjet kvazi-statičke simulacije u Abaqus/Explicit-u je određivanje vremenske granice stabilnosti koja se dobiva preko najniže prirodne frekvencije sustava. U ovom slučaju najmanja prirodna frekvencija sustava je  $f_1 = 28,415$  Hz, iz čega slijedi da je  $T_{stable} \geq 0,036$  s. Treći uvjet u svezi je s prva dva te glasi da omjer kinetičke i unutarnje energije mora biti manji od 0,1. Dakle potrebno je iterirati dovoljno malen vremenski period kako bi simulacija zahtjevala manje vremena za proračun i dovoljno brzi pomak koji i dalje neće izazvati skokove u kinetičkoj energiji sustava. Za potrebe simulacije zadan je vremenski period od 0,04 s. Potpuni lom epruvete u dijagramu manifestiran je stohastičkim oscilacijama unutarnje i kinetičke energije kako je to vidljivo na slici 6.4.



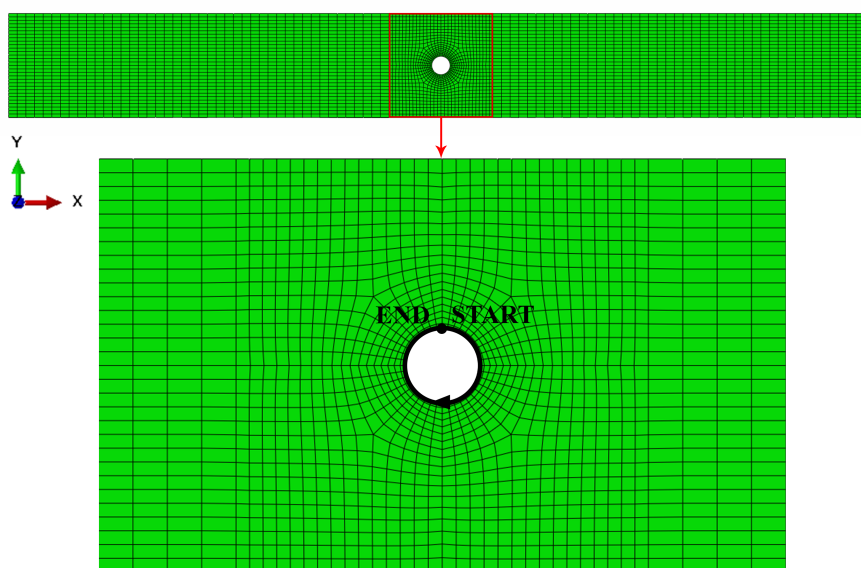
Slika 6.4: Energije kvazi-statičke simulacije u Abaqus/Explicit

Za validaciju LaRC05 kriterija korišteni su C3D8R konačni elementi zajedno s Abaqus/Standard solverom. Za Hashin-ov kriterij, proveden u Abaqus/Explicit-u upotrijebljeni su SC8R elementi, po jedan red za svaki sloj. S obzirom da je geometrija epruvete izrađena

od jednog cjelovitog dijela podijeljenog na 12 geometrijskih čelija, modeliranje kontakta nije bilo potrebno. Oba modela sadržavaju isti broj konačnih elemenata i čvorova. Slika 6.5 uz mrežu konačnih elemenata prikazuje i put na rubu otvora po kojem su očitane vrijednosti kriterija popuštanja, a koji su kasnije ispisani u dijagramima za LaRC05 i Hashin-ov kriterij. Put, odnosno krivulja po kojoj su očitane vrijednosti indeksa popuštanja ima smjer kazaljke na satu. Vrijednosti indeksa popuštanja za navedenu krivulju ispisani su u ovisnosti o normaliziranom opsegu otvora, što znači da se vrijednosti  $x$  osi kreću od 0 do 1, gdje je 0,5 mjesto na donjoj strani otvora.

Tablica 6.4: Mreža konačnih elemenata testne epruvete

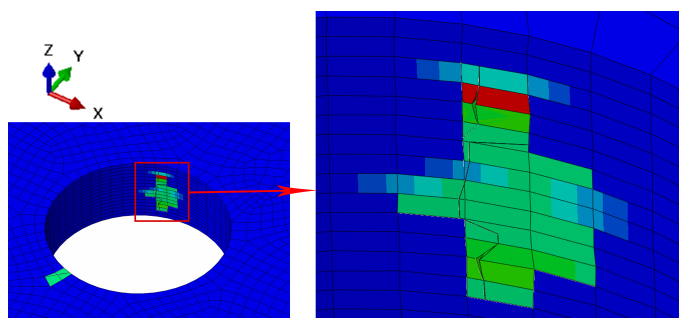
Komponenta	Broj elemenata	Broj čvorova	Vrsta elementa
Epruveta	60160	66776	(SC8R Hashin, C3D8R LaRC05)



Slika 6.5: Mreža konačnih elemenata u validacijskom modelu

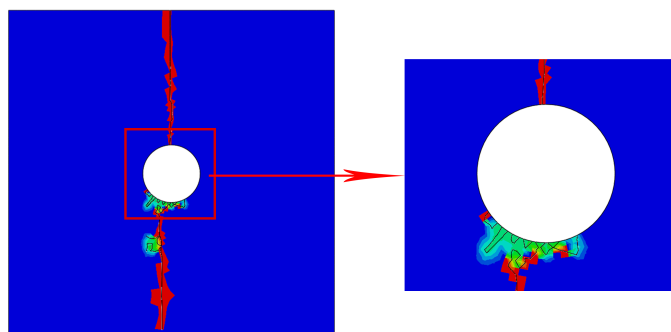
Cilj provođenja simulacije bila je usporedba novoimplementiranog LaRC05 kriterija u Abaqus/CAE s Hashin-ovim kriterijem. Izradom modela i provođenjem simulacija koristeći Abaqus/CAE pretprocesor s Abaqus/Standard solverom, pojavile su se značajne prepreke s propagacijom pukotine koja koristi XFEM pristup, a s kojim se brišu oštećeni elementi. Greška koja uzrokuje prekid simulacije povezana je u propagaciji pukotine kao greška nivo skupa (eng. *level set error*), a izazvana je ulaskom dvije pukotine u jedan ele-

ment. Kako bi se propagacija stabilizirala uveden je koeficijent prigušenja u *Step* modulu u iznosu od 0,0002, a kada to nije eliminiralo pukotinu, čak i kada je koeficijent bio uvećan za deset puta, simulacija je opet provedena s opcijom koja ograničava koliko energije je dopušteno disipirati u svakom inkrementu. Ovaj parametar iznosio je također 0,0002, odnosno 0,02, no ni ta promjena u modelu nije rezultirala uspjehom. Svaka simulacija u prosjeku trajala je 8 sati i kovergencija bi stala na iznosu od 28 kN što je za 25,9 % manje od prosjeka eksperimenta. Zanimljivo je za primijetiti da bi provođenje dva identična modela rezultiralo s dva različita skupa rezultata, što ukazuje na nestabilnu narav trenutne implementacije LaRC05 kriterija i XFEM-a na složenije rasporede slojeva i vjerojatno je posljedica nedeterminističkog ponašanja XFEM-a. Na slici 6.6 prikazana je situacija u kojoj su dvije pukotine ušle u jedan konačni element uzrokujući prekid simulacije. Slika 6.7 predstavlja uspješno provođenje simulacije s pukotinom koja je propagirala kroz cijeli kompozitni dio.



Slika 6.6: Primjer greške u vrijednosti nivo skupa - dvije pukotine u elementu

Ove poteškoće uklonjene su pri simuliranju jednostavnijih rasporeda kompozitnih slojeva (npr.  $\pm 45$  ili  $0/90$ ) ali i većih rasporeda slojeva istih orijentacija.

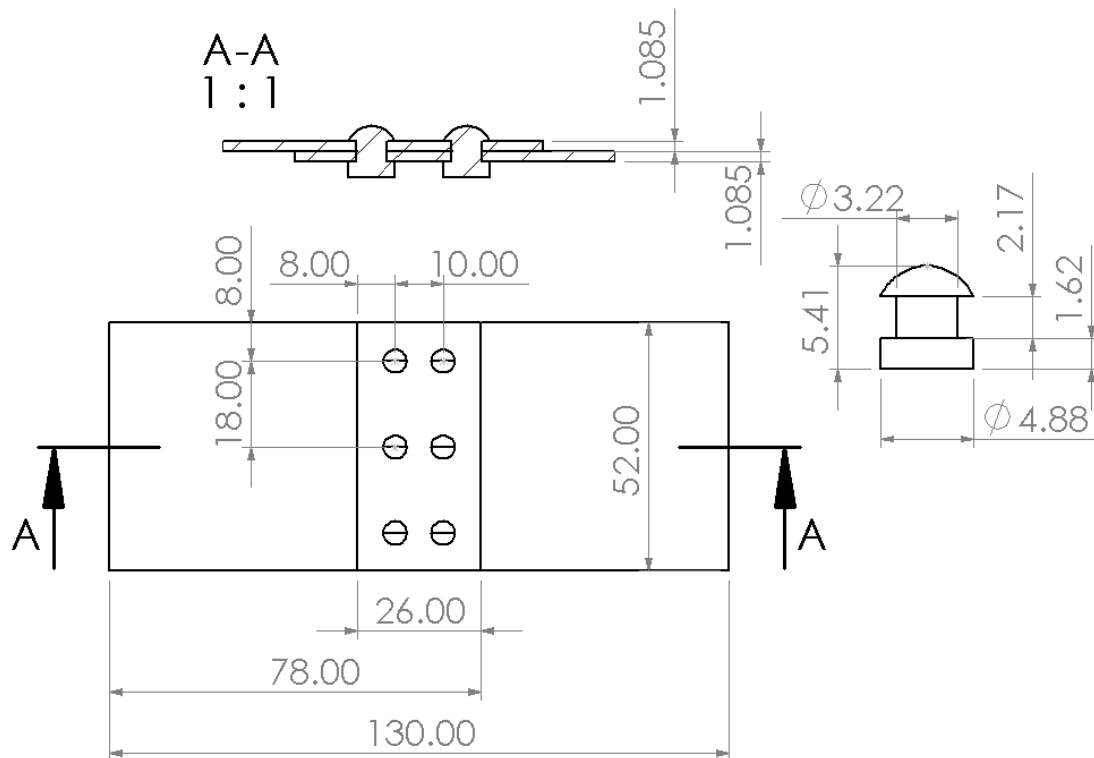


Slika 6.7: Uspješna propagacija pukotine/a u kompozitu s dva sloja

## 6.2 Model realnog detalja

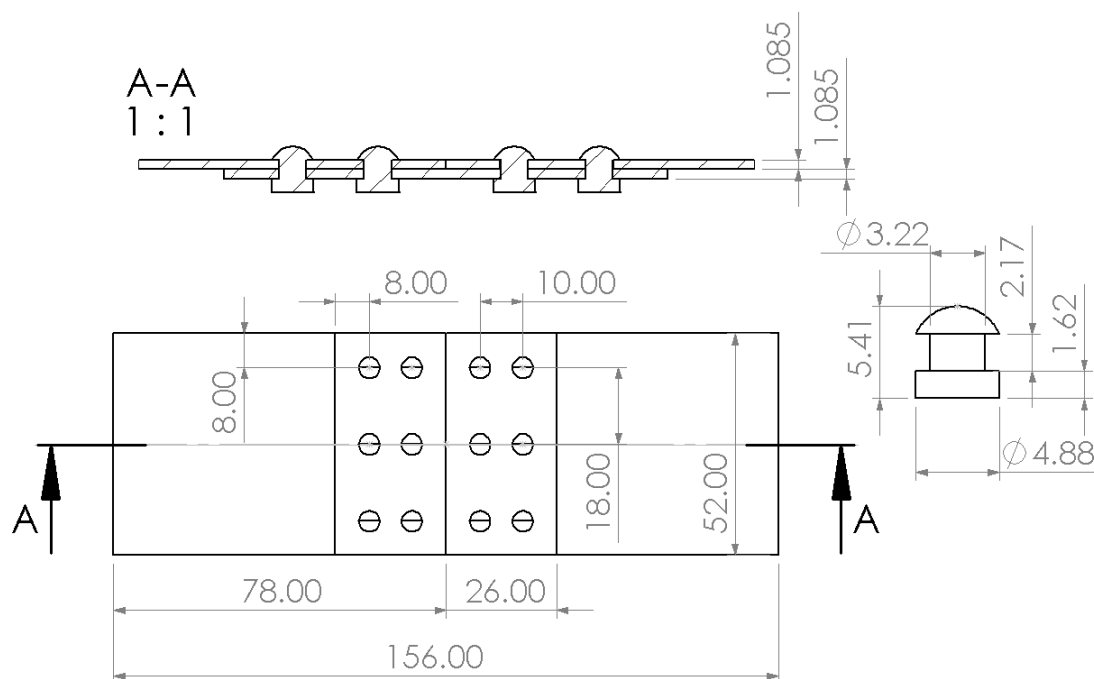
Za primjenu LaRC05 i Hashin-ovog kriterija na detalju realne konstrukcije, odabrana su tri spoja najčešće korištena u zakovičnim spojevima u avionima, preklopni, stični i stični ojačan ljepilom s dvorednom usporednom konfiguracijom zakovica. Prilikom dimenzioniranja spojeva, praćena su generalna pravila za dimenzioniranje zakovica. Odabrane dimenzije prikazane su na slikama 6.8 i 6.9, a odgovaraju minimalnim zahtjevima:

- promjer zakovice ( $D$ ) mora biti najmanje tri puta veći od najdebljeg panela u spoju
- udaljenost između zakovica mora biti veća od  $3D$
- udaljenost zakovica od rubova panela mora biti najmanje  $2D$
- promjer glave zakovice mora iznositi između  $1,25D$  i  $1,66D$
- visina glave zakovice mora iznositi između  $0,66D$  i  $0,33D$ .



Slika 6.8: Preklopni dvoredni spoj, [mm]





Slika 6.9: Jednostični četveroredni spoj, [mm]

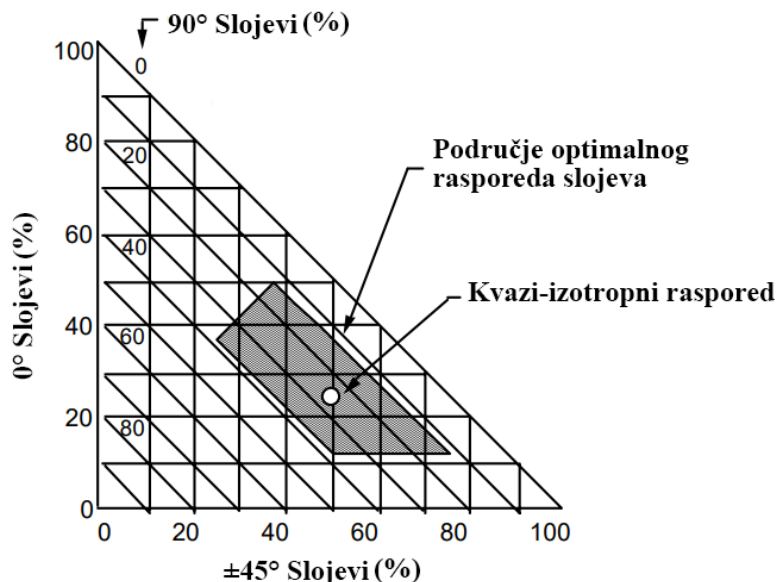
Kao materijal zakovice odabran je nehrđajući čelik PH17-4, a alternativno se mogu koristiti i titanijeve legure. U kompozitnim slojevima ne koristi se aluminij zbog velike opasnosti od galvanke korozije koja nastaje prilikom dodira ugljičnih vlakana i aluminija ukoliko se oksidni sloj na aluminiju ošteti. Po pitanju običnog čelika galvanška korozija također može nastupiti, a ako se materijal nalazi u okruženju sa slanom vodom ili otopinom za odleđivanje, brzina nastupa galvanške korozije raste za 25 do 60 puta [43]. Za nehrđajući čelik i titanijeve legure ne postoje validni dokazi koji ukazuju na pojavu galvanške korozije. Svojstva odabranog materijala čelika iznesena su u tablici 6.5.

Tablica 6.5: Svojstva PH-17 čelika [44]

Modul elastičnosti	204 GPa
Poissonov koeficijent	0,29

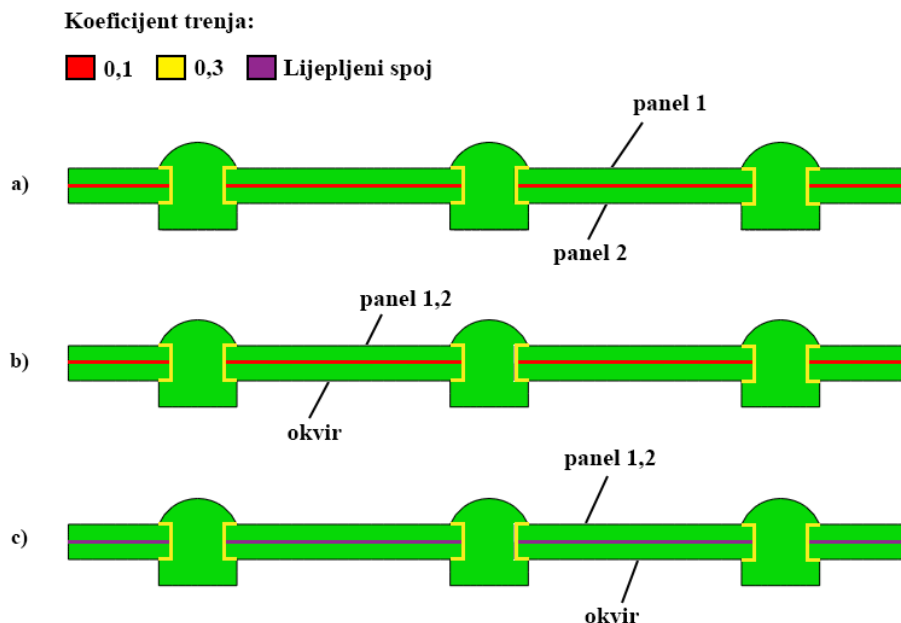
Raspored slojeva kompozita odabran je pomoću dijagrama iz [45], a iznosi [+45/-45/0/90/0/-45/+45] ( $\pm 45^\circ \approx 57\%$ ,  $0^\circ \approx 29\%$ ,  $90^\circ \approx 14\%$ ). Ovaj raspored slojeva nije kvazi-izotropan, ali se i dalje nalazi u području optimalnog rasporeda slojeva za zakovične konstrukcije. Razlog tome je što bi veći raspored slojeva zahtijevao i veće numeričke resurse, no uz to, pregledom realnih konstrukcija zrakoplova, primijećuje se da su tamo korištene debljine kompozitnih dijelova ionako u rasponu od 1 do 2 mm, ovisno radi li se o panelu trupa ili ojačanju poput okvira i uzdužnica koji su malo deblji. Kompozitni materijal isti je onom

korištenom prilikom validacije modela 6.1. Paneli i okviri u svim spojevima koristit će isti raspored slojeva a njihova debljina iznosit će 1,085 mm s debljinom sloja od 0,155 mm (7 slojeva).



Slika 6.10: Optimalni raspored slojeva za zakovični spoj kod kompozita [45]

Modeliranje kontakta bitno je kako bi numerički rezultati bili što vjerniji realnom slučaju. Neadekvatno definirana svojstva kontakta mogu dovesti do prevelikog ili premalog iznosa sile popuštanja. Ako bi koeficijent trenja bio manji od realnog, sila popuštanja bila bi manjeg iznosa, s obzirom da bi razlike energija koje bi prethodno bile disipirane trenjem, sada pridonosile popuštanju konstrukcije. Kod prevelikog koeficijenta trenja situacija bi bila suprotna. Svojstva kontakta površina u modelima prikazana su na slici 6.11. Za površine na kojima su zakovice u kontaktu s ostalim dijelovima konstrukcije, faktor trenja iznosi 0,3 dok za dodir između panela i okvira koeficijent iznosi 0,1. Važno je napomenuti da zadržavajuća sila zakovice nije unesena u model, no pretpostavlja se da je utjecaj iste reprezentiran većim koeficijentom trenja za sve površine dodira zakovice. S obzirom na nezamjetnu dodatnu masu i unaprijeđena svojstva čvrstoće, kao treći slučaj promatra se ljepljom ojačani stični spoj koji spada u kategoriju hibridnih spojeva. Lijepljeni kontakt modeliran je pomoću kohezivnih površina, a odabrano ljepilo je Scotch-Weld 9323 B/A firme 3M koje je namijenjeno za zrakoplovnu i svemirsku industriju. Uspostava kontakta tijekom simulacije vrši se u zasebnom koraku prije djelovanja pomaka. Svojstva ljepila, odnosno krutosti čvrstoće i energije loma za dva načina otvaranja pukotine ispisane su u tablici 6.6.



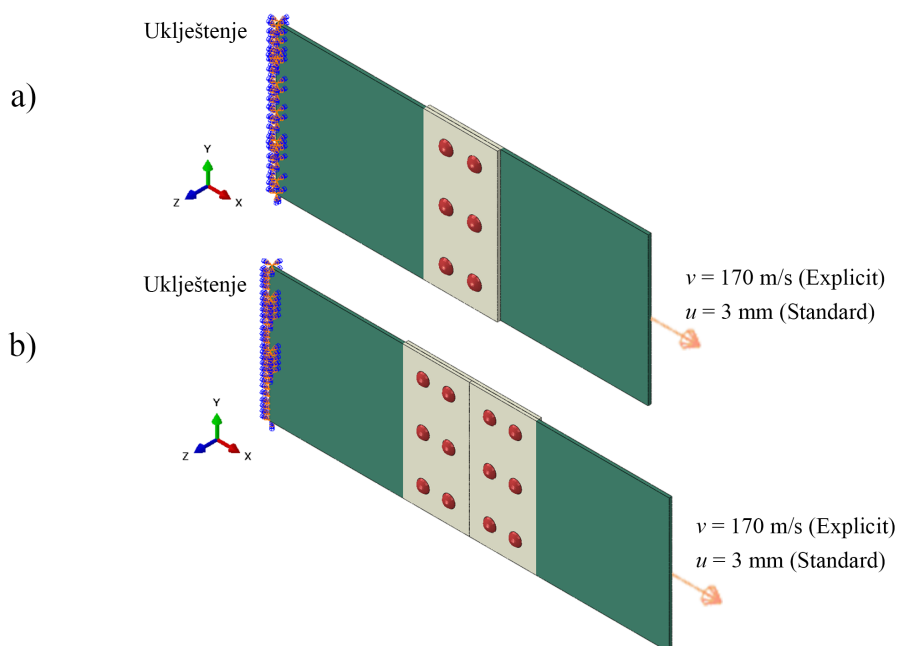
Slika 6.11: Svojstva interakcije površina u spojevima: a) preklopni spoj; b) stični dvoredni, c) stični dvoredni s lijepljenim ojačanjem

Tablica 6.6: Svojstva ljepila Scotch-Weld 9323 B/A [46]

Veličina	Oznaka	Iznos	Mjerna jedinica
Normalna krutost	$K_I$	2800	N/mm
Smična krutost	$K_{II}$	1000	N/mm
Normalna čvrstoća	$\tau_I$	25	MPa
Smična čvrstoća	$\tau_{II}$	35	MPa
Energija loma za način I	$G_{Ic}$	800	N/mm
Energija loma za način II	$G_{IIc}$	7000	N/mm

Na modele u kojima je simulacija provedena Abaqus/Standard solverom, na desni kraj modela primijenjen je linearni pomak u iznosu od 3 mm. Na modele u kojima je simulacija provedena Abaqus/Explicit solverom, umjesto pomaka zadana je brzina u iznosu od 170 mm/s u dva koraka. Iznos brzine od 170 mm/s predstavlja vremensko ubrzanje od 1000 puta u odnosu na brzine na kidalicama koje u eksperimentima iznose 1 mm/min (0,017 mm/min). U prvom koraku brzina raste linearno do iznosa od 170 mm/s u 0,005 s, a zatim ostaje konstantna do završetka simulacije u koraku koji traje 0,04 s. Ovakvim unosom opterećenja, gdje je pomak gradijalan u početku, na konstrukciji se izbjegavaju dinamični efekti i oscilacije u modelu, koje značajno utječu na rezultate do samog kraja simulacije a koji su neželjeni kod kvazi-statičkih simulacija. U svim modelima na lijevom kraju zadano

je uklještenje. Rubni uvjeti modela prezentirani su na slici 6.12 gdje se rubni uvjeti pod b) odnose na obje varijante stičnog spoja.



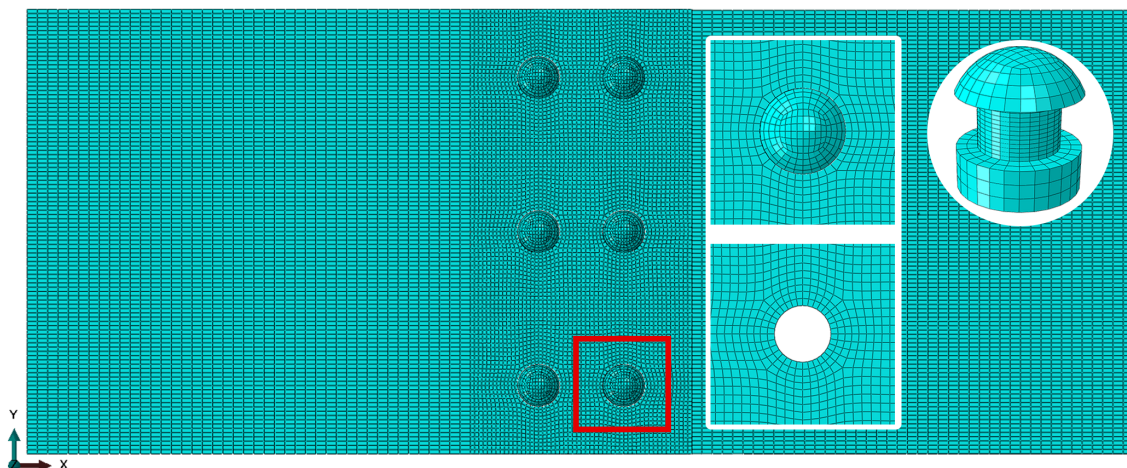
Slika 6.12: Rubni uvjeti spojeva: a) preklopni spoj; b) stični dvoredni

Podatci o mreži konačnih elemenata preklopnog spoja izneseni su u tablici 6.7, a podatci o mreži stičnog i stičnog ljepilom ojačanog spoja u tablici 6.8. Kako bi se izbjegle prekomjerne deformacije elemenata u blizini otvora panela i okvira koristit će se elementi drugog reda (eng. *second order accuracy*) u kombinaciji s *enhanced* kontrolom *hourglassing*. Slika 6.13 prikazuje mrežu konačnih elemenata preklopnog spoja s detaljima u području zakovice, uključujući i zakovicu. Na slici 6.14 također je prikazana mreža konačnih elemenata stičnog i stičnog lijepljenog spoja s detaljem oko otvora i zakovicom.

Tablica 6.7: Mreža konačnih elemenata preklopnog spoja

Komponenta	Broj elemenata	Broj čvorova	Vrsta elementa
Panel	70840	83360	SC8R
Zakovica	1752	2212	C3D8R
$\Sigma$	152192	180008	

Preklopni spoj diskretiziran je s 152192 elemenata i 180008 čvorova. Svaki panel sadrži 70840 SC8R elemenata i 70740 čvorova, a pojedina zakovica 1752 C3D8R elemenata 2212 čvorova.

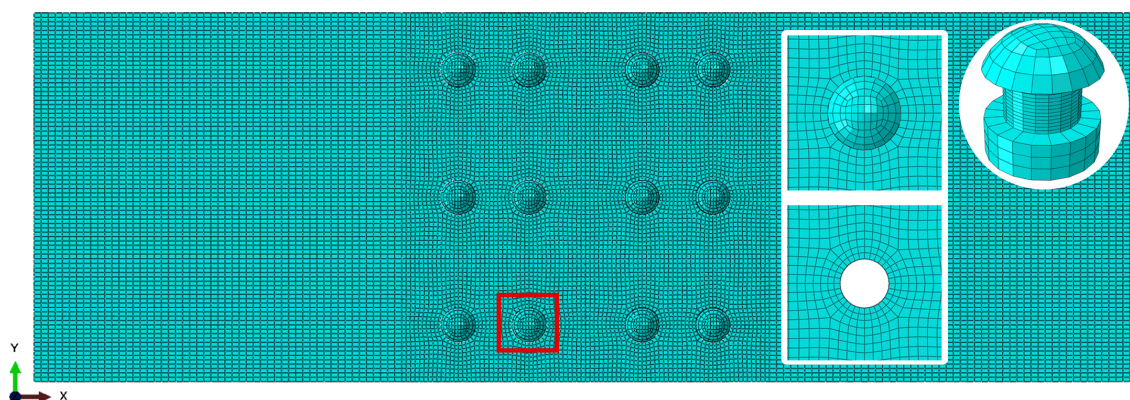


Slika 6.13: Mreža konačnih elemenata na preklopnom spoju s detaljem oko otvora

Tablica 6.8: Mreža konačnih elemenata stičnog spoja

Komponenta	Broj elemenata	Broj čvorova	Vrsta elementa
Panel	56616	66856	SC8R
Okvir	78540	93056	SC8R
Zakovica	956	1260	C3D8R
$\Sigma$	203244	241888	

Stični spoj diskrežiziran je s ukupno 203255 elemenata i 241888 čvorova. Paneli su opisani s 56616 SC8R elemenata i 66856 čvorova, a okvir s 78540 SC8R elemenata i 93065 čvorova. Zakovice sadrže 956 elemenata i 1260 čvorova.



Slika 6.14: Mreža konačnih elemenata na stičnom spoju s detaljem oko otvora

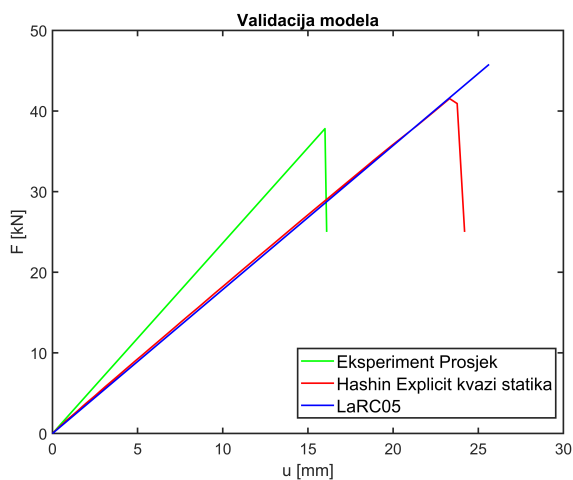
## Rezultati

### 7.1 Rezultati validacije

Primijećena je razlika u krutosti rezultata dobivenih eksperimentalno iz [41] i numeričkih modela provedenih u svrhe ovog rada, a razlika je vidljiva na dijagramu sila-pomak prikazanom slikom 7.1. Maksimalna sila dobivena prema Hashin-ovom kriteriju iznosi 41,54 kN. Dok u eksperimentu epruveta popušta pri pomaku od 16 mm, numerički model popušta na nešto većem iznosu od 23 mm. Kako model oštećivanja nije bilo moguće provesti za LaRC05 kriterij, za njega nije dobivena maksimalna sila stoga su sile u tablici 7.1 predstavljene samo za eksperiment i Hashin-ov model.

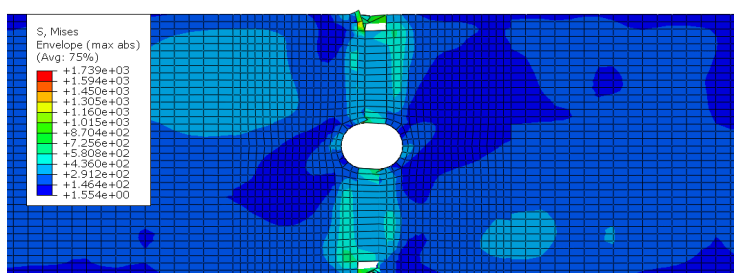
Tablica 7.1: Maksimalna sila eksperimenta i numeričke analize

	<b>Eksperiment</b>	<b>Numerika (Hashin)</b>	<b>Razlika %</b>
Sila [kN]	37,81	41,54	8,98



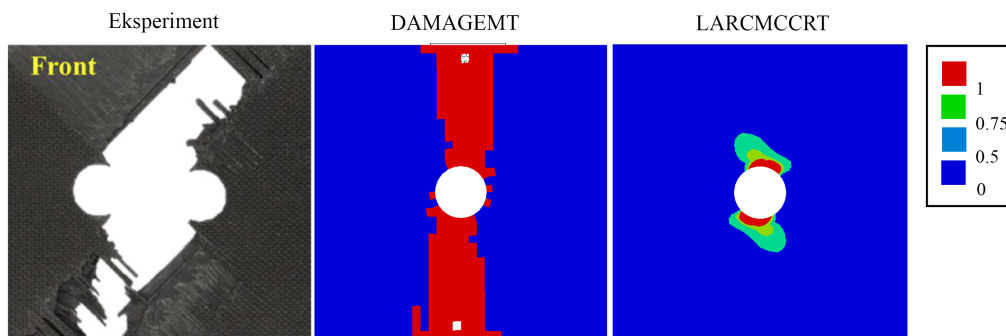
Slika 7.1: Usporedba dijagrama sila-pomak

U trenutku potpune pukotine epruvete, svi slojevi duž smjera oštećenja su odvojeni, osim slojeva koji su orijentirani pod kutom od  $90^\circ$ . Elementi koji diskretiziraju te slojeve su značajno deformirani, a razlog tomu je što se brisanje elemenata kontrolira varijablom *DAMAGEFT*, koja opisuje napredak oštećenja vlakana uslijed vlačnog opterećenja. Vlakna u slojevima orijentiranim pod  $90^\circ$  ne preuzimaju vlačno opterećenje, pa zbog toga neće ni doći do njihovog oštećenja na taj način, no smatra se da su s obzirom na nisku čvrstoću matrice koja preuzima svo opterećenje, ti slojevi popustili i prije drugih, unatoč tome što nisu ispunili uvjet brisanja. Opisana situacija prikazana je na slici 7.2 gdje su po sredini epruvete vidljivi neobrisani deformirani elementi.



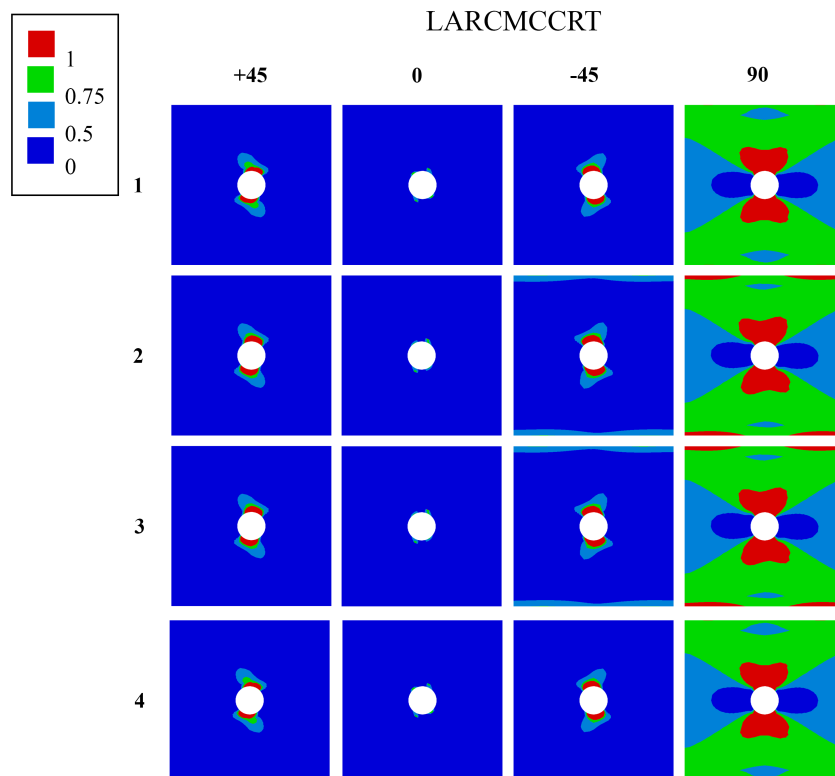
Slika 7.2: Deformirani elementi koji nisu ispunili uvjet brisanja varijablom *DAMAGEFT*

Na slici 7.3 uspoređene su varijable *DAMAGEMT* i varijabla loma matrice kriterija *LaRC05*, *LARCMCCRT*, s epruvetom iz eksperimenta iz [41], nakon totalnog loma. Varijable su prikazane za prvi sloj epruvete koji je orijentiran pod  $+45^\circ$ . *DAMAGEMT* varijabla dobro opisuje konačno oštećenje epruvete iz eksperimenta dok *LARCMCCRT* indeks nije toliko rasprostranjen, ali inidicira na isto usmjerenje popuštenih zona na epruveti. Na slikama od 7.4 do 7.17 prikazane su raspodjele popuštanja Hashin-ovog i *LaRC05* kriterija popraćene dijagramima indeksa popuštanja oko otvora po krivulji prikazanoj na slici 6.5 izraženoj preko normaliziranog opsega otvora.



Slika 7.3: Usporedba epruvete u trenutku potpunog loma [41] s *DAMAGEMC* i *LARCMCCRT* varijablama

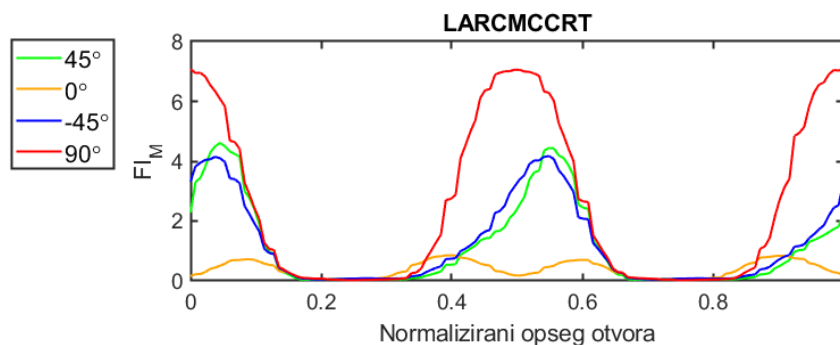
Promatrajući LaRC05 kriterij popuštanja uslijed loma matrice na slici 7.4, primjećuje se značajnije oštećenje matrice na slojevima pod  $90^\circ$ , što je posljedica djelovanja opterećenja okomito na smjer vlakana, odnosno zbog toga što svo opterećenje u sloju uglavnom preuzima matrica koja ima značajno manju čvrstoću od vlakna. U svim slojevima oštećeno područje imat će orijentaciju vlakana u sloju.



Slika 7.4: Raspodjela LaRC05 kriterija loma matrice

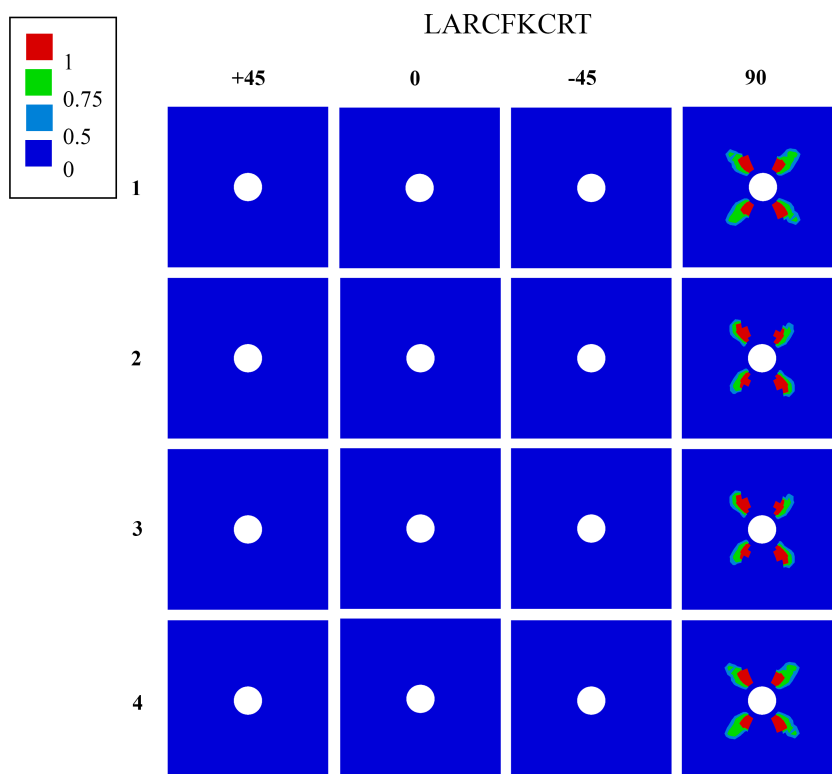
Na slici 7.5 na kojoj je prikazana raspodjela vrijednosti indeksa LaRC05 kriterija popuštanja uslijed loma matrice po otvoru vidljivo je da vrijednosti indeksa popuštanja matrice za slojeve pod  $45^\circ$ ,  $-45^\circ$  i  $90^\circ$  prelaze iznos 1, što je posljedica nepostojanja modela oštećivanja u numeričkom modelu u protivnom bi ti iznosi imali maksimalne vrijednosti 1 kao što je to slučaj kod rezultata modela na koje je primijenjen Hashin-ov model popuštanja.





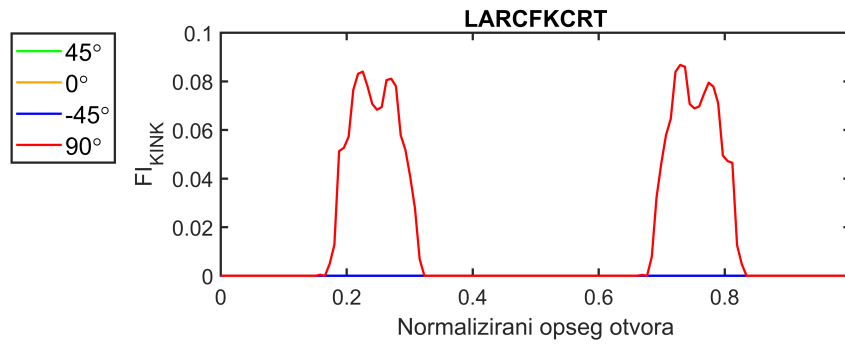
Slika 7.5: LaRC05 kriterij loma matrice na rubu otvora

Kako je vidljivo na slici 7.6, popuštanje vlakna uslijed izvijanja prema LaRC05 kriteriju inicirano je jedino za slojeve orijentirane pod  $90^\circ$ s usmjerenjima od  $\pm 45^\circ$  na mjestima udaljenim od otvora pločice.



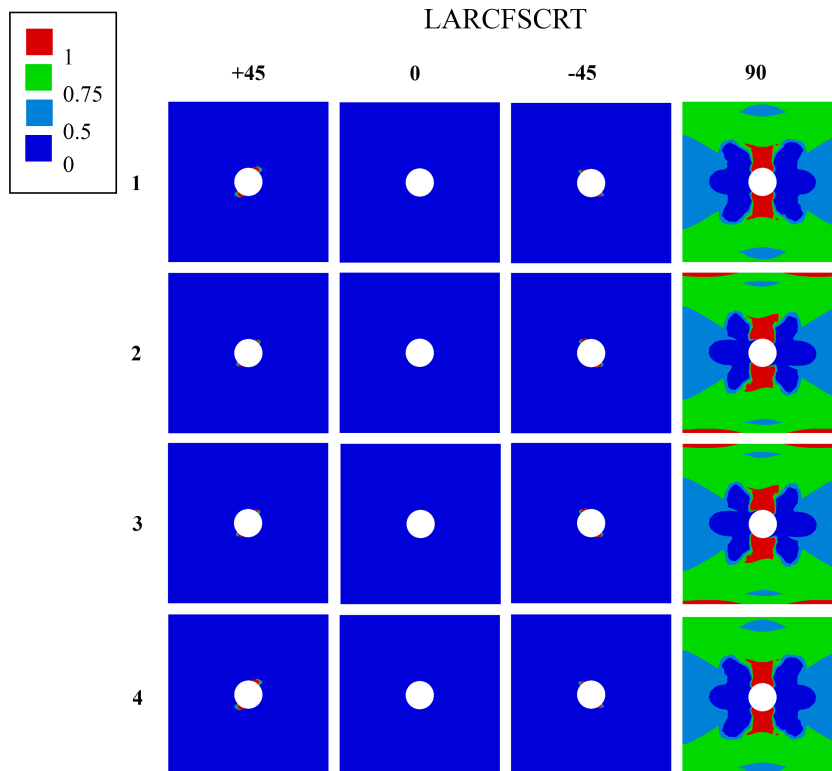
Slika 7.6: Raspodjela LaRC05 kriterija izvijanja vlakana

Raspodjela popuštanja uslijed izvijanja vlakana vizualizirana je dijagramom na slici 7.7 gdje je vidljivo da će vrijednosti kriterija iznositi 0 za slojeve pod  $45^\circ$ ,  $-45^\circ$  i  $0^\circ$ , a na sloju od  $90^\circ$  one će imati iznos 0,1. Iako je za očekivati da bi otvor bio izvor najvećih vrijednosti indeksa popuštanja, kod ovog kriterija maksimalne iznose kriterij doseže tek na udaljenostima od otvora većim od radijusa otvora kako je to prikazano na slici 7.6.



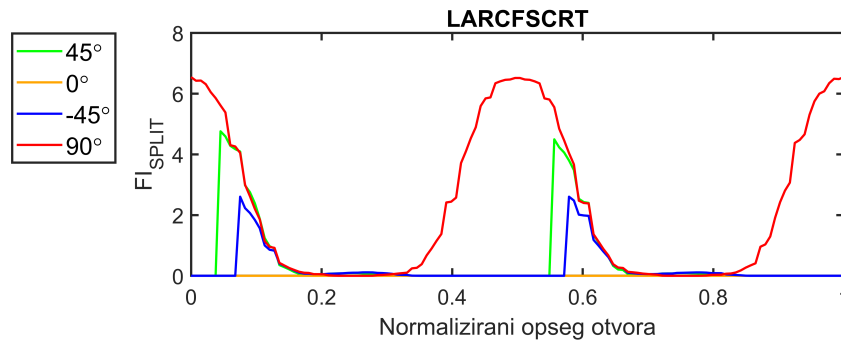
Slika 7.7: LaRC05 kriterij izvijanja vlakna na rubu otvora

Kriterij popuštanja za lom vlakana prikazuje značajne zone oštećenja za slojeve pod  $90^\circ$  kao što je vidljivo na slici 7.8, dok je za slojeve pod  $45^\circ$  i  $-45^\circ$  stupnjeva oštećenje minimalno. Na slojevima pod  $0^\circ$  kriterij nije iniciran.



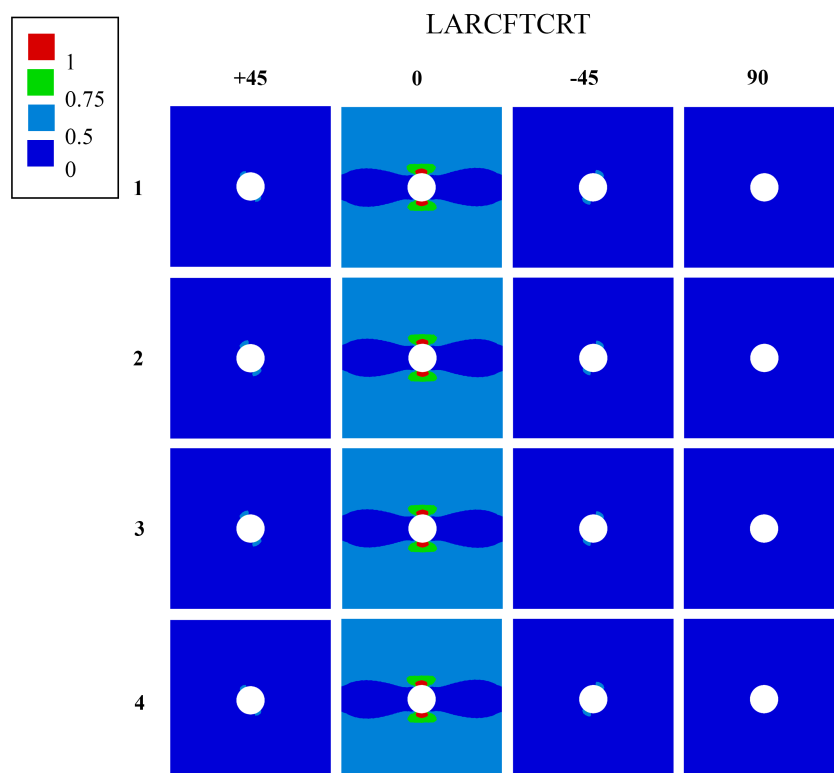
Slika 7.8: Raspodjela LaRC05 kriterija loma vlakana

Raspodjela indeksa popuštanja za lom vlakana kriterija na dijagramu na slici 7.9, pokazuje da je kriterij značajno ušao u područje popuštanja za sve slojeve osim one pod  $0^\circ$ . Ovdje također iznosi kriterija imaju značajno veće vrijednosti od 1, što je opet posljedica ne uvođenja modela oštećivanja, a koji nije bilo moguće uvesti zbog prethodno iznesenih problema u provođenju simulacija, opisanih u poglavlju Numerički modeli.



Slika 7.9: LaRC05 kriterij loma vlakana na rubu otvora

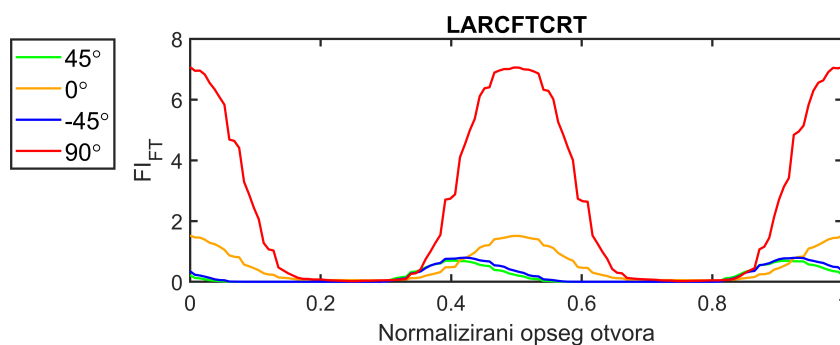
Posljednji kriterij kojeg opisuje LaRC05 kriterij prikazan na slici 7.10, vezan je za vlačno opterećenje vlakna. On očekivano sadrži minimalne vrijednosti za sve slojeve osim onih pod  $0^\circ$ . Na slojevima pod  $0^\circ$  oštećenje je rasprostranjeno po cijeloj površini osim na dijelovima ispred i iza otvora u smjeru vlakana.



Slika 7.10: Raspodjela LaRC05 kriterija vlačnog opterećenja vlakana

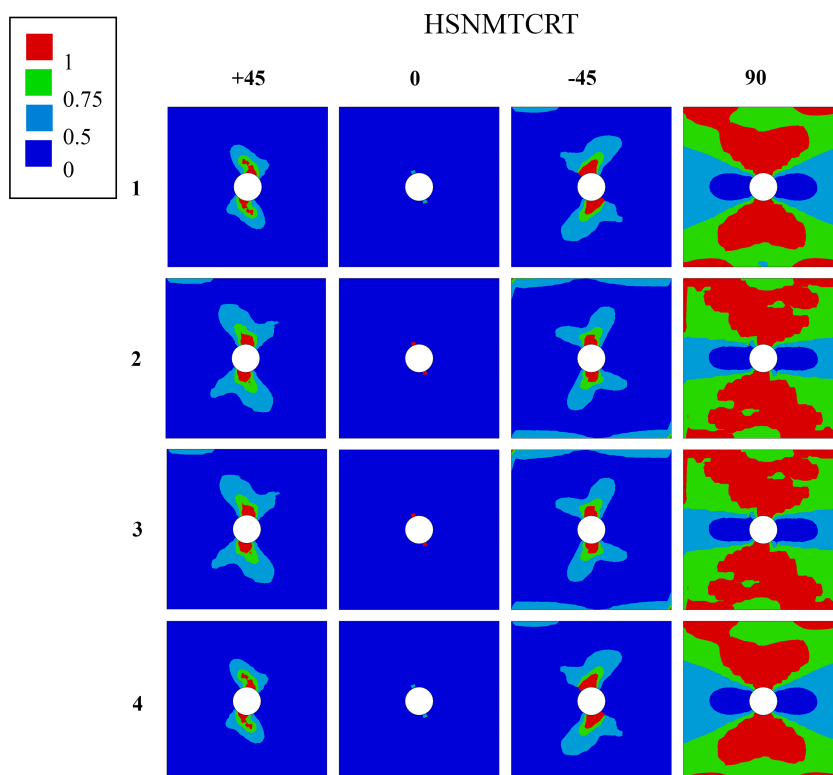
Promatranjem dijagrama raspodjele popuštanja oko otvora za LaRC05 kriterij popuštanja vlakana uslijed tlaka, na slici 7.11, primijećuje se kako popuštanja inicirana tek za slojeve orijentirane po  $90^\circ$  i  $0^\circ$ . Slojevi pod  $45^\circ$  i  $-45^\circ$  indiciraju na identičnu situaciju popuštanja, no ukoliko se pogleda vizualni prikaz raspodjele popuštanja slojevi pod orijentacijom od

-45° sadržavaju nešto površinski veće zone popuštanja. Vidljivo je da je za slojeve pod 0° tek inicirano popuštanje dok je za slojeve od 90° popuštanje puno prije pokrenuto.



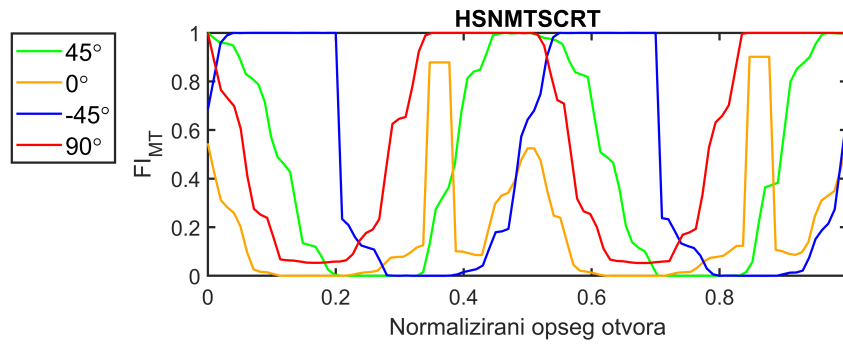
Slika 7.11: LaRC05 kriterij vlačnog opterećenja vlakna

Sagledavanjem Hashin-ovog kriterija za vlačno popuštanje matrice na slici 7.12, primjećuje se usmjerenje oštećenih zona okomito smjeru vlakna, s maksimalnim vrijednostima na slojevima pod 90° i nepostojećim iznosima u slojevima orijentiranim pod 0°.



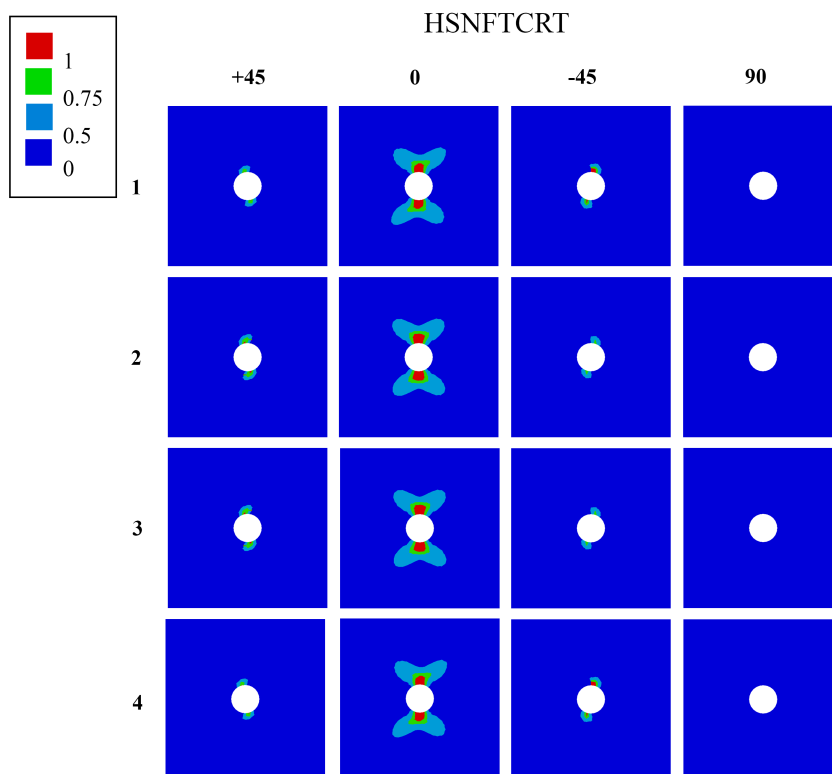
Slika 7.12: Raspodjela Hashin-ovog kriterija vlaka matrice

Raspodjela popuštanja za Hashin-ov kriterij vlaka matrice u dijagramu na slici 7.13 pokazuju kako su popustili svi slojevi osim onih orijentiranih po 0°, no i ti iznosi bliže se inicijaciji popuštanja s maksimumima koji dosežu vrijednosti 0,9.



Slika 7.13: Hashin-ov kriterij vlačnog opterećenja matrice

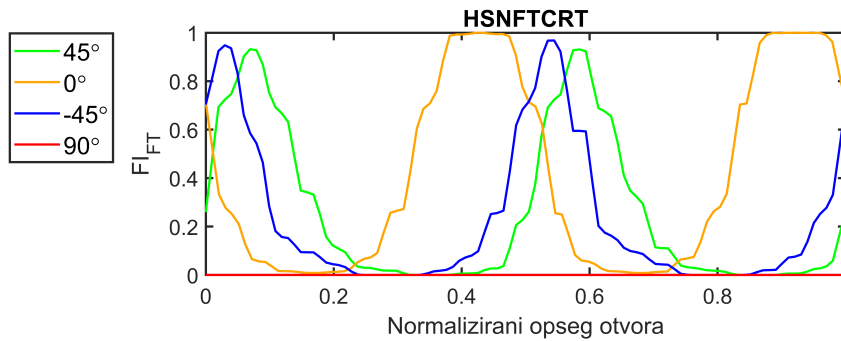
Uspoređujući Hashin-ov prikaz kriterija za vlačno opterećenje vlakana, prikazan na slici 7.14, s LaRC-ovim, može se zaključiti kako je Hashin-ov kriterij konzervativniji, što je posljedica dodatka u jednadžbi za  $F_f^t$ , a koji je nadodan na kvadrirani član kojim se izražava LaRC-ov kriterij,  $\alpha \left( \frac{\hat{\tau}_{12}}{S_L} \right)^2$ .



Slika 7.14: Raspodjela Hashin-ovog kriterija vlačno opterećenje vlakana

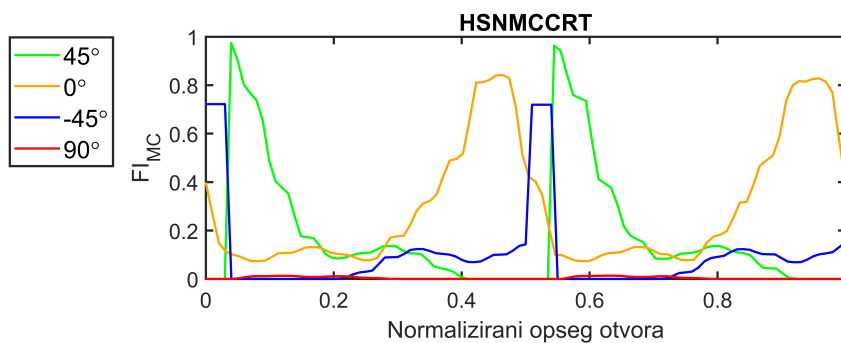
Raspodjela iznosa indeka popuštanja za Hashin-ov kriterij vlačnog popuštanja vlakana pokazuje da je iniciran za slojeve pod  $0^\circ$  te da će uskoro biti iniciran i za slojeve pod  $45^\circ$  i  $-45^\circ$ . Vidljivo je u dijagramu na slici 7.15 kako je vrijednost indeksa kriterija vlačnog

popuštanja vlakana jednak nuli za slojeve pod  $90^\circ$ .



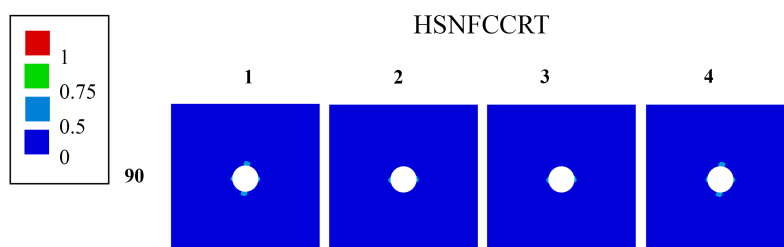
Slika 7.15: Hashin-ov kriterij vlačnog opterećenja vlakana

Očekivano, indeks Hashin-ovog kriterija tlaka matrice prema dijagramu na slici 7.16 nije dosegao kritičnu vrijednost ni na jednom sloju, dok su zone oštećenja veoma male i pojavljuju se na svim slojevima osim onima pod  $90^\circ$ .



Slika 7.16: Hashin-ov kriterij tlačnog opterećenja matrice

Hashin-ov kriterij za tlak vlakana nije iniciran niti za jedan sloj, a tek za slojeve od  $90^\circ$  pokazuje vrijednosti koje se kreću između 0,5 i 0,75 na malim površinama oko otvora što je vidljivo na slici 7.17.



Slika 7.17: Raspodjela Hashin-ovog kriterija vlačnog opterećenja vlakana

Prema iznesenim podatcima, primjetno je da je Hashin-ov kriterij konzervativniji u usporedbi s LaRC05 kriterijem, jer za isto stanje naprezanja, LaRC05 pokazuje veći stupanj

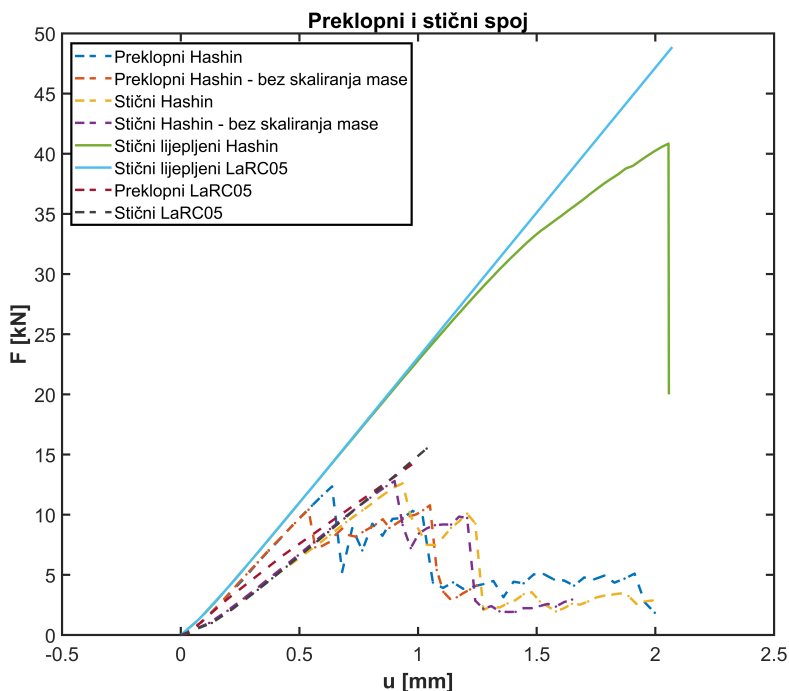
oštećenja po svim kriterijima popuštanja. Ovakvi rezultati mogu dovesti do predimenzioniranja konstrukcija stoga je uz numeričke rezultate potrebno provesti i eksperimentalnu provjeru zajedno s primjenom drugih kriterija popuštanja. Ovakav pristup omogućio bi pronalazak idealnih parametara konstrukcija i optimizirao eksploataciju, pogotovo u zrakoplovnoj industriji, gdje je ušteda na masi jedan od primarnih ciljeva i zadaća.

## 7.2 Rezultati zakovičnih spojeva

Promatranjem dijagrama sila-pomak, moguće je zaključiti kako preklopni i stični spoj popuštaju pri sličnim iznosima sile, dok stični spoj ima manju krutost od preklopnog i time i veći pomak pri maksimalnoj sili. Uspoređujući stični i stični lijepljeni spoj vidljiva je značajno veća razlika u silama popuštanja od 3,2 puta. Stični lijepljeni spoj doživljava krhki lom za razliku od duktilnog loma u spojevima bez ljepila koji nakon maksimalne sile uđu u nestabilno područje. No kako se u modelima radi o čistom vlaknu, može se smatrati da bi u realnom slučaju konstrukcija potpuno popustila kada bi oštećenja oko zakovica bila dovoljno velika da bi one ispale iz otvora, a što bi se dogodila daleko prije nego to pokazuju rezultati simulacija. Simulacije preklopnog i običnog stičnog spoja provedene su s i bez skaliranja mase, kako bi se promotrio učinak istog. Skaliranje mase uvodi se u kvazi statičke simulacije kako bi one konvergirale s manjim brojem iteracija. Dobiveni rezultati odstupaju s 15,6% kod preklopnog spoja, koji je u modelu bez skaliranja mase imao dva maksimuma sile za razliku od jednog u modelu sa skaliranjem mase. Kod običnog stičnog spoja oblici i iznosi krivulja podudarali su se s razlikama manjim od 3%. Stični spoj ojačan ljepilom proveden je sa skaliranjem mase s obzirom da su prethodne simulacije običnog stičnog i preklopnog spoja bez skaliranja mase trebale 24 sata kako bi izvršile 20% zadanog pomaka, dok je za cijelu simulaciju sa skaliranjem mase, u oba modela, bilo potrebno oko 12 sati.

Na slici 7.18 prikazane su krivulje sila-pomak dobivene za tri varijante zakovičnih spojeva. Sve krivulje dobivene su ekstrapoliranjem vrijednosti u referentnoj točki definiranoj na desnom kraju spoja u kojoj je također zadan pomak tj. brzina. Promatrajući krivulje preklopnog spoja, vidljivo je da će krivulja dobivena Hashin-ovim modelom bez skaliranja mase sadržavati dvije vršne vrijednosti, gdje će druga biti veći od prve za 3,34 %. Krivulje modela s i bez skaliranja mase za stični spoj pokazuju dobro preklapanje vrijednosti. Krivulje preklopnog i stičnog spoja dobivene s i bez skaliranja mase dobro se poklapaju u nestabilnom području. Krivulje koje predstavljaju stični lijepljeni spoj dobivene su kroz isti način te značajno odstupaju od prethodna dva spoja. U ovom slučaju maksimalna sila lijepljenog spoja iznositi će 40,84 kN što je uvećanje za 257 % od maksimalne sile

preklopnog spoja, odnosno 221 % maksimalne sile stičnog spoja. Uspoređujući krivulje dobivene LaRC05 i Hashin-ovim kriterijem primjećuje se razlika u krutosti kod preklopnog spoja, dok se krutosti stičnog spoja i stičnog ojačanog spoja za LaRC05 i Hashin-ov kriterij dobro poklapaju.



Slika 7.18: Usporedba dijagrama sila-pomak za tri spoja

Iznosi maksimalnih sila dobivenih provođenjem numeričkih modela nalaze se u tablici 7.2. Maksimalna sila stičnog spoja iznosi 12,705 kN i za 11 % je veća u odnosu na maksimalnu silu preklopnog spoja. Maksimalna sila stičnog spoja ojačanog ljepljivo značajno odstupa u odnosu na maksimalne sile iz prethodna dva modela i ona je veća za 257 % u odnosu na preklopni.

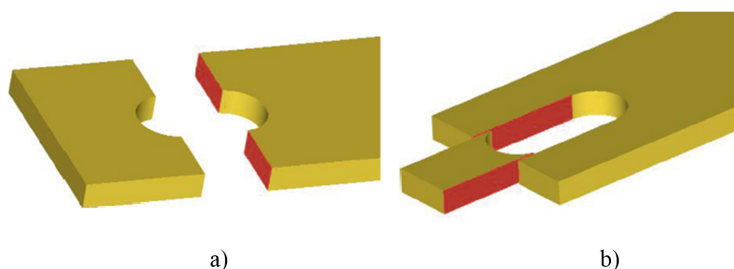
Tablica 7.2: Maksimalni iznosi sila u spojevima

Spoj	$F_{avg}$ [kN]	Razlika u odnosu na preklopni
Preklopni	11,435	-
Stični	12,705	+11,1%
Stični ojačani	40,840	+257% preklopni

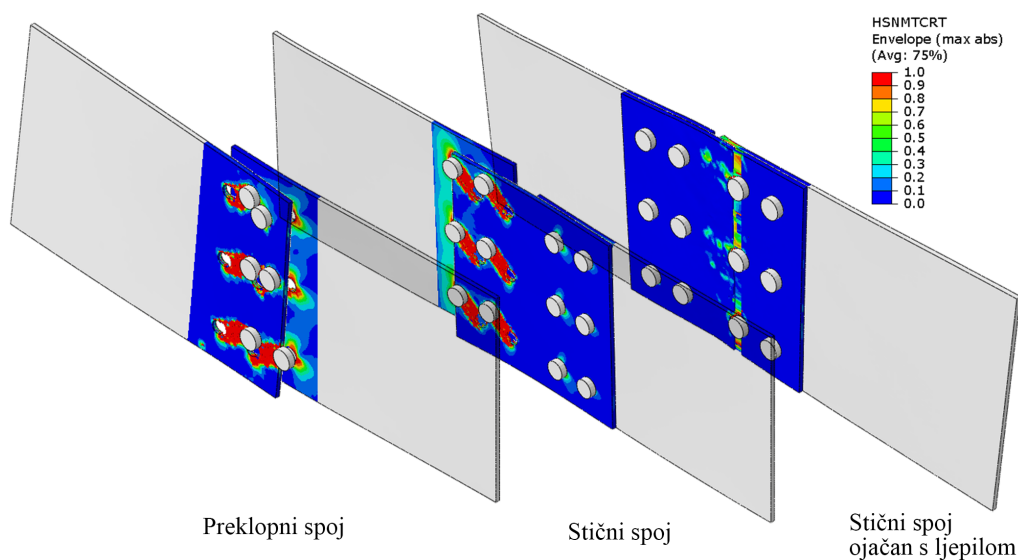
Pregledom rezultata simulacija vidljivo je da preklopni spoj popušta mehanizmom popuštanja zvanim *eng. Shear Out* koji se manifestira raspolavljanjem kompozitnog dijela u smjeru okomitom na djelovanje opterećenja, dok stični lijepljeni spoj popušta *eng. Net-tension*



*Failure* mehanizmom koji je okarakteriziran izvlačenjem materijala u smjeru djelovanja opterećenja na mjestu ispred zakovice. Slika 7.19 prikazuje dva mehanizma popuštanja zakovičnih spojeva koji se događaju u provedenim simulacijama. Mehanizam pod a) prikazuje mehanizam popuštanja koji se odvija u stičnom ljepljenom spoju, dok onaj pod b) predstavlja mehanizme popuštanja preklopnog i običnog stičnog spoja. Na slici 7.20 prikazani su pomoću varijable *HSNMTCRT* mehanizmi popuštanja u posljednjem trenutku simulacije za svaki od provedenih modela. U zonama obojanim crvenom bojom nalazi se izvučeni materijal *Shear Out* mehanizma, a *Net-tension Failure* mehanizam popuštanja na lijepljenom spoju vidljiv je pukotinom koja je propagirala kroz unutarnji stupac zakovica okomito na smjer djelovanja pomaka.



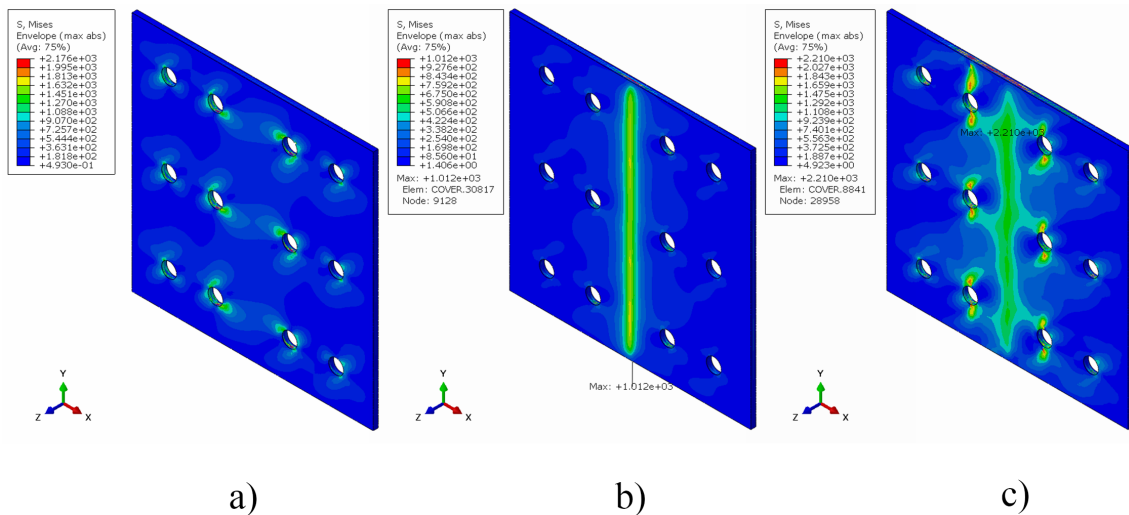
Slika 7.19: Mehanizmi popuštanja zakovičnih spojeva: a) *Net-tension Failure* b) *Shear Out*



Slika 7.20: Oblici popuštanja tri promatrana spoja prikazani HSNMTCRT varijablom

U običnom stičnom i stičnom spoju ojačanom ljepljom, lokacija maksimalnih napreznja, a konzekventno i mjesta popuštanja, nalazi se na okviru, odnosno stičnici. Na slici 7.21 uočavaju se razlike raspodjela napreznja na okvirima spojeva. Na okviru običnog stičnog

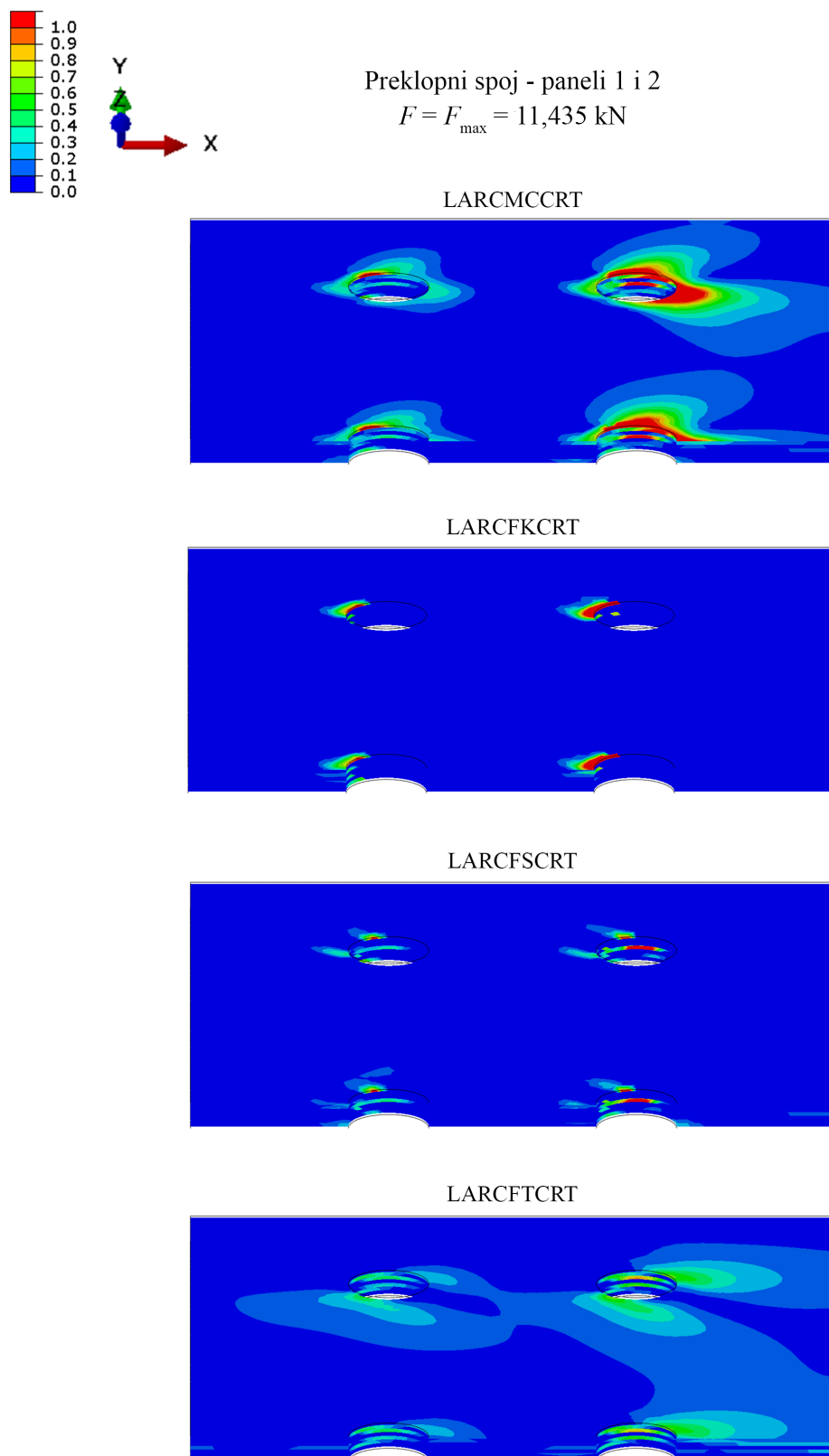
spoja, koncentracija naprezanja nalazi se oko otvora, dok kod okvira stičnog ojačanog spoja, maksimalno naprezanje nalazi se na mjestu preklopa dva panela. To maksimalno naprezanje daljnjim unosom pomaka na konstrukciju širi se lateralno i počinje stvarati nove maksimume iznad i ispod otvora koji se nalaze na prvom stupcu otvora od sredine okvira. Na tim otvorima potom dolazi i do krhoga loma.



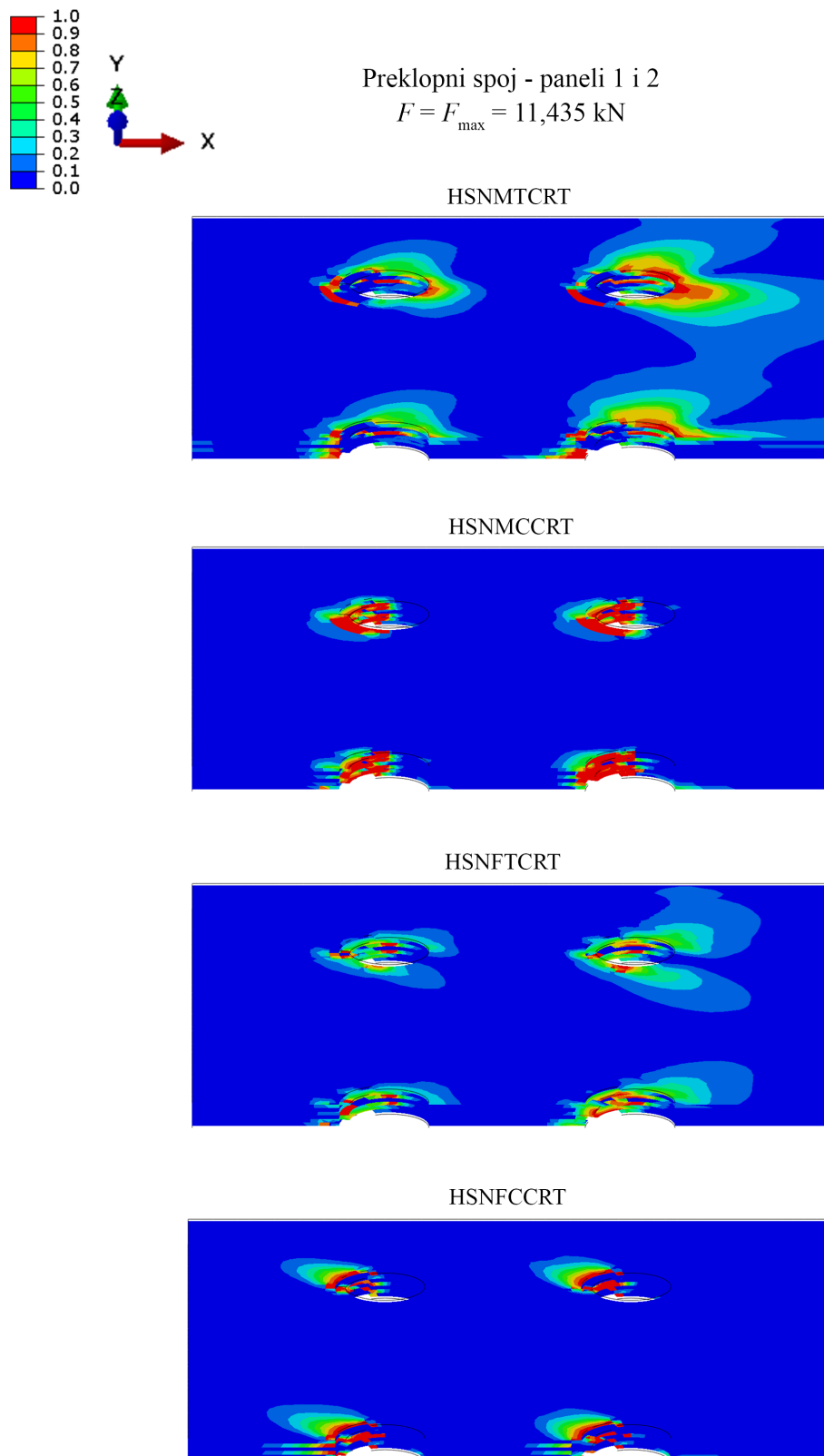
Slika 7.21: Usporedba raspodjele von Mises naprezanja [MPa] na okviru stičnog spoja: a) stični pri maksimalnoj sili, b) stični ojačani pri maksimalnoj sili, c) stični ojačani pri maksimalnoj sili

Raspodjele Hashin-ovog i LaRC05 kriterija popuštanja prikazane su za maksimalne iznose sila u spojevima na slikama 7.22 - 7.36.

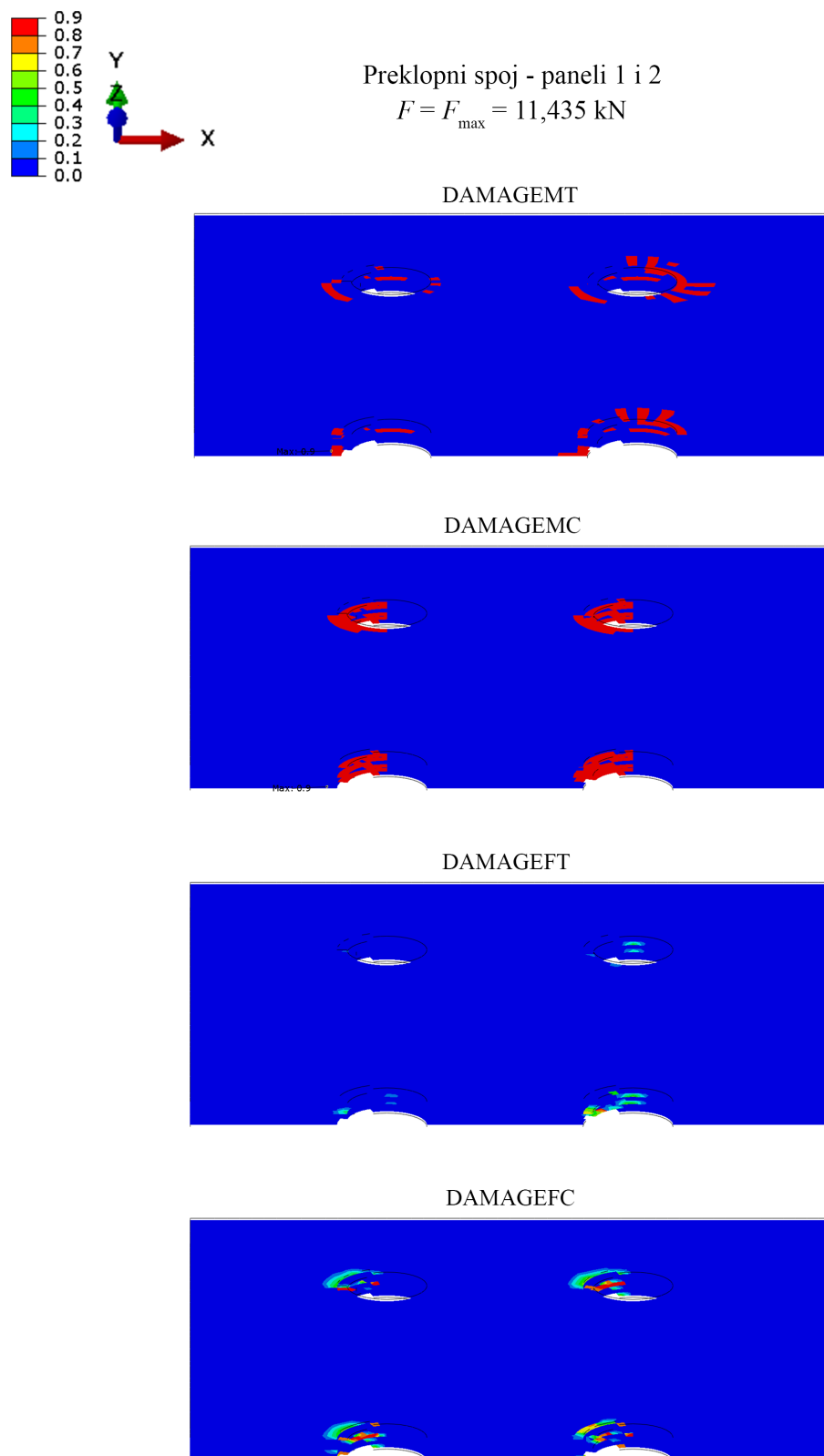
Na slici 7.22 preklopnog spoja, LaRC05 kriterij pokazuje inicijaciju oštećenja matrice na panelima preklopnog spoja kao i inicijaciju popuštanja uslijed izvijanja, loma i vlačnog opterećenja vlakana iznad i ispod zakovičnih otvora. Hashin-ov kriterij prema slici 7.23 pokazuje da su paneli popustili na otvorima u smjeru djelovanja pomaka, tj. brzine. Uočava se poklapanje površina i magnituda popuštanja za HSNMTCRT i LARCMCRTC varijable koje su prikazane na slici 7.22. LaRC05 kriterij također pokazuje popuštanje slojeva uslijed izvijanja i loma vlakana na slici 7.22, dok popuštanje vlakna uslijed vlačnog opterećenja još nije inicirano. U trenutku najveće sile neki elementi već su izbrisani, i to pomoću DAMAGEFC varijable, dok varijabla DAMAGEFT pokazuje značajno manja oštećenja oko otvora. Raspodjela varijabli oštećenja nalazi se na slici 7.24.



Slika 7.22: Raspodjela LaRC05 kriterija popuštanja na panelima preklopnog spoja

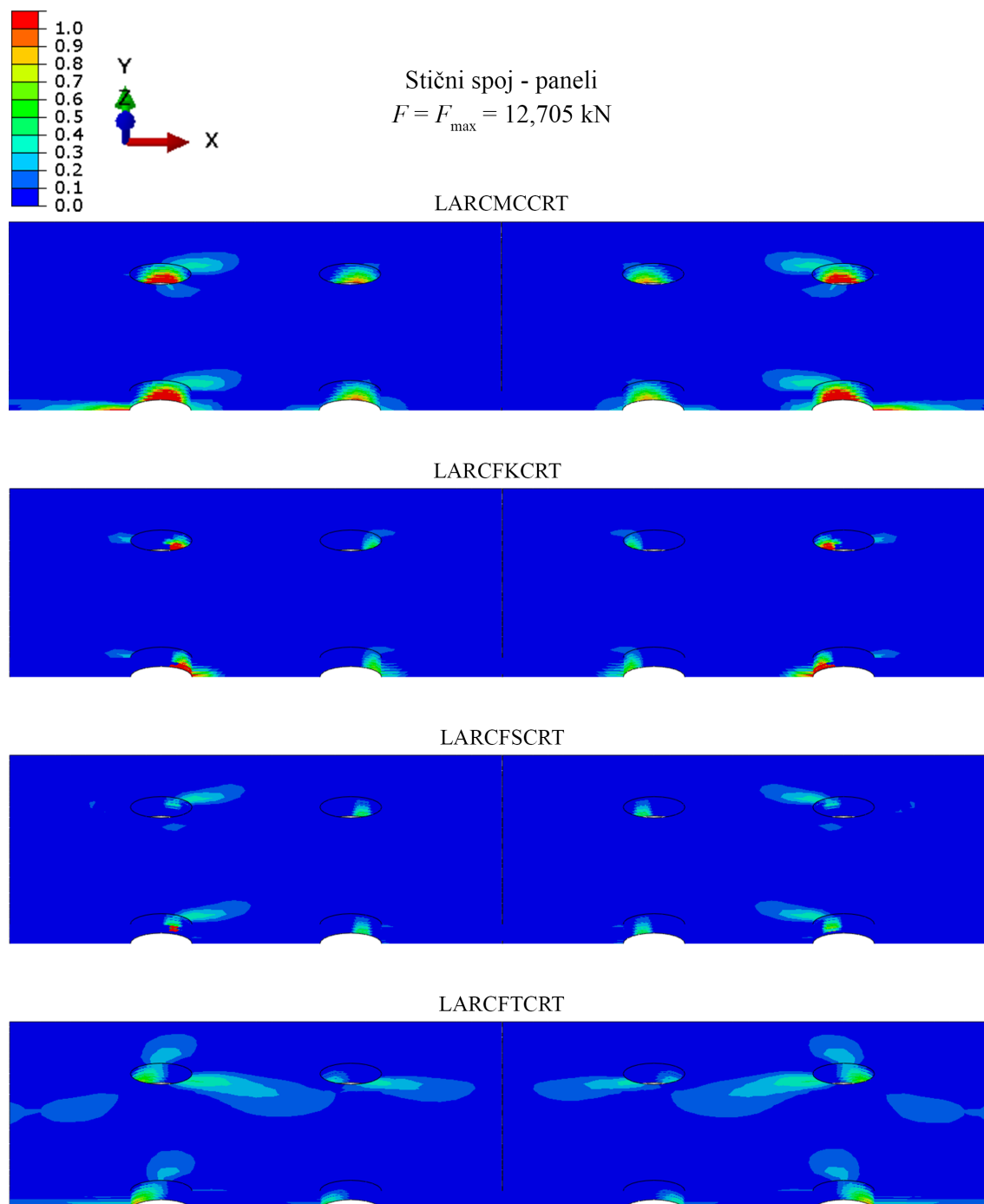


Slika 7.23: Raspodjela Hashin-ovog kriterija popuštanja na panelima preklopnog spoja



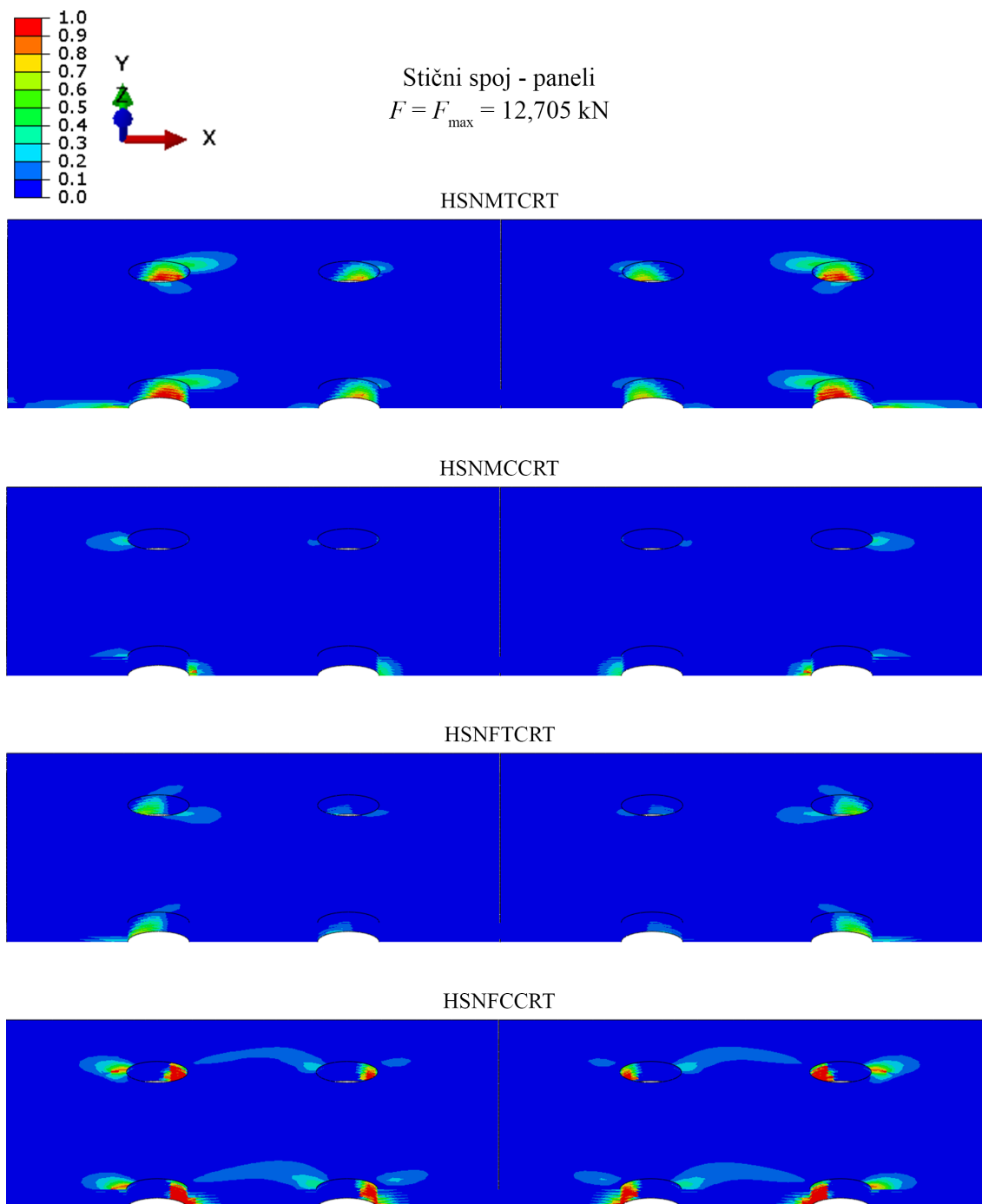
Slika 7.24: Raspodjela parametara oštećenja na panelima stičnog spoja

LaRC05 kriterij na slici 7.25 na panelima običnog stičnog spoja pokazuje popuštanja matrice na vanjskim stupcima zakovica iznad i ispod otvora sa smanjenjem kriterija od sredine panela u smjeru normale površine. Vlakna su popustila uslijed izvijanja na istim, vanjskim, otvorima, a lom vlakana iniciran je tek u jednom otvoru. Popuštanje uslijed vlačnog opterećenja nije inicirano ni za jedan otvor ali postoje indikacije da će paneli napredovanjem opterećenja na istim vanjskim otvorima popustiti i na taj način.



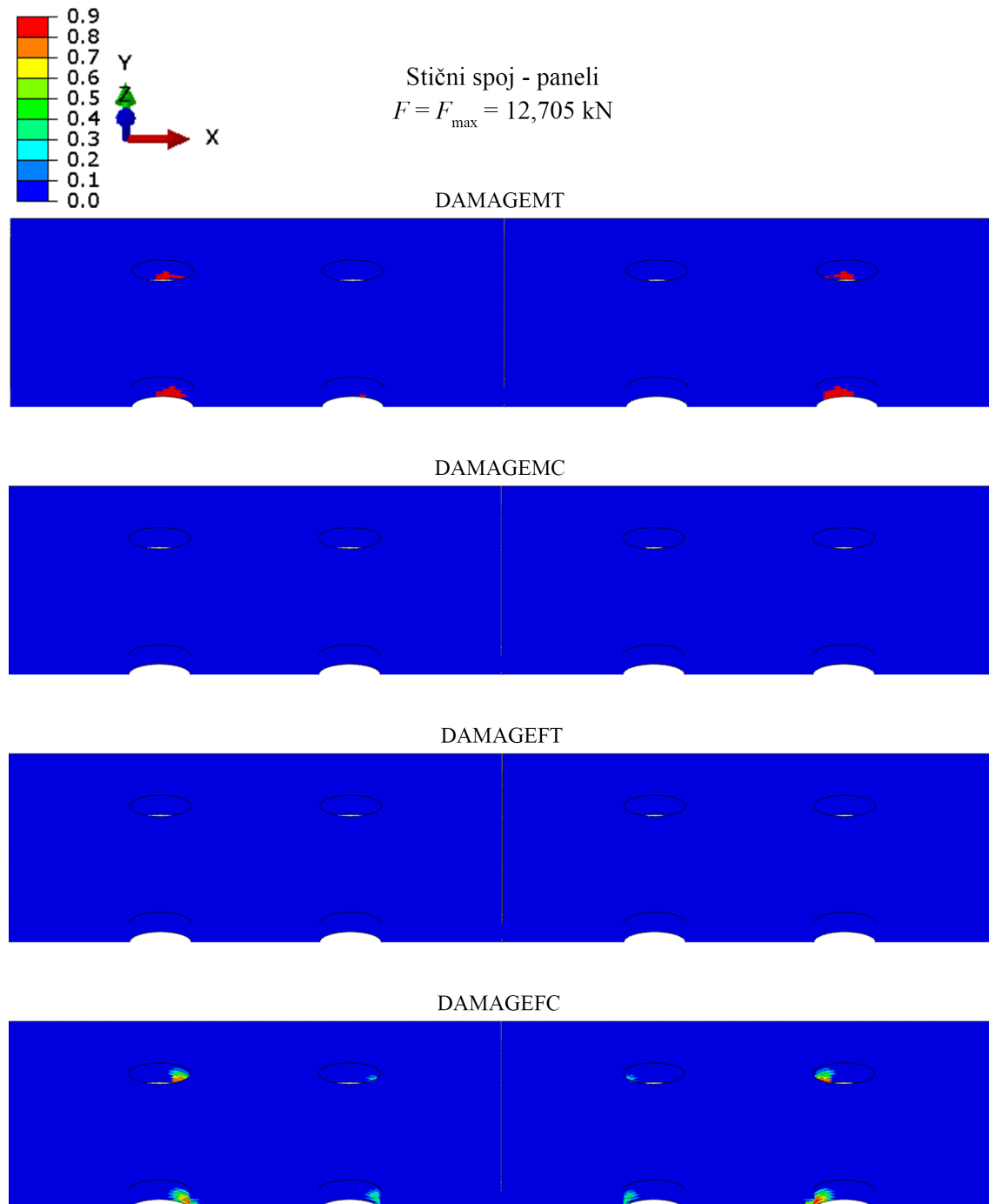
Slika 7.25: Raspodjela LaRC05 kriterija popuštanja na panelima stičnog spoja

Na slici 7.26 Hashin-ov kriterij pokazuje značajne zone popuštanja za dva kriterija, vlak matrice i tlak vlakana koji su dosegli kritičnu vrijednost na svim zakovičnim stupcima. Oba kriterija rastu od središnjeg sloja prema vanjskoj površini panela. Kriterij koji opisuje popuštanje uslijed tlaka matrice iniciran je na dva sitna područja na sloju od  $0^\circ$  vanjskog stupca i srednjeg reda zakovica.



Slika 7.26: Raspodjela Hashin-ovog kriterija popuštanja na panelima stičnog spoja

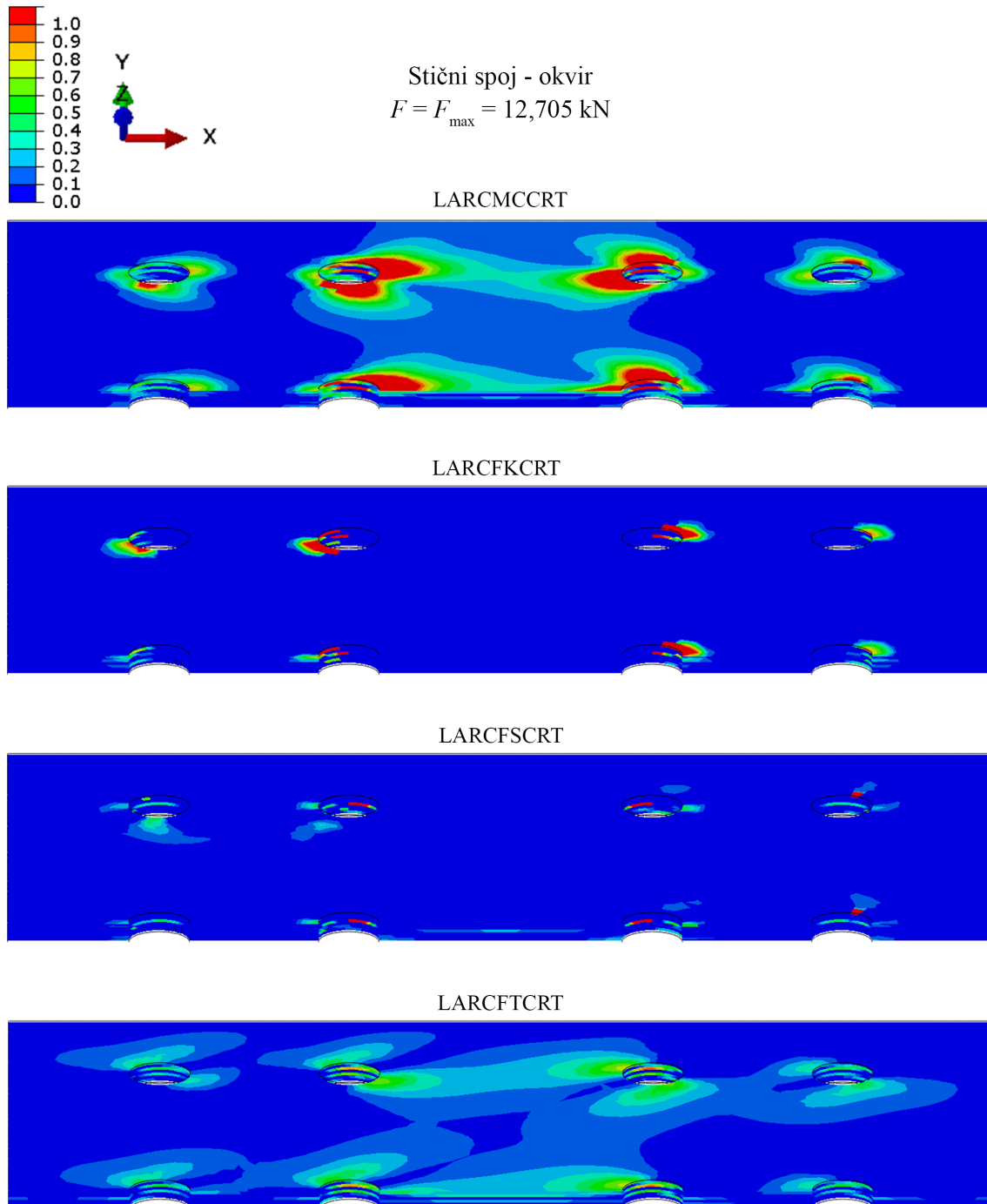
U ovom modelu došlo je do oštećenja uslijed vlakna matrice i kompresije vlakana. Obje izlazne varijable, DAMAGEMT i DAMAGEFC svoje ekstreme imaju na istim lokacijama. Oštećenje panela stičnog spoja prikazano je na slici 7.27.



Slika 7.27: Raspodjela parametara oštećenja na panelima stičnog spoja

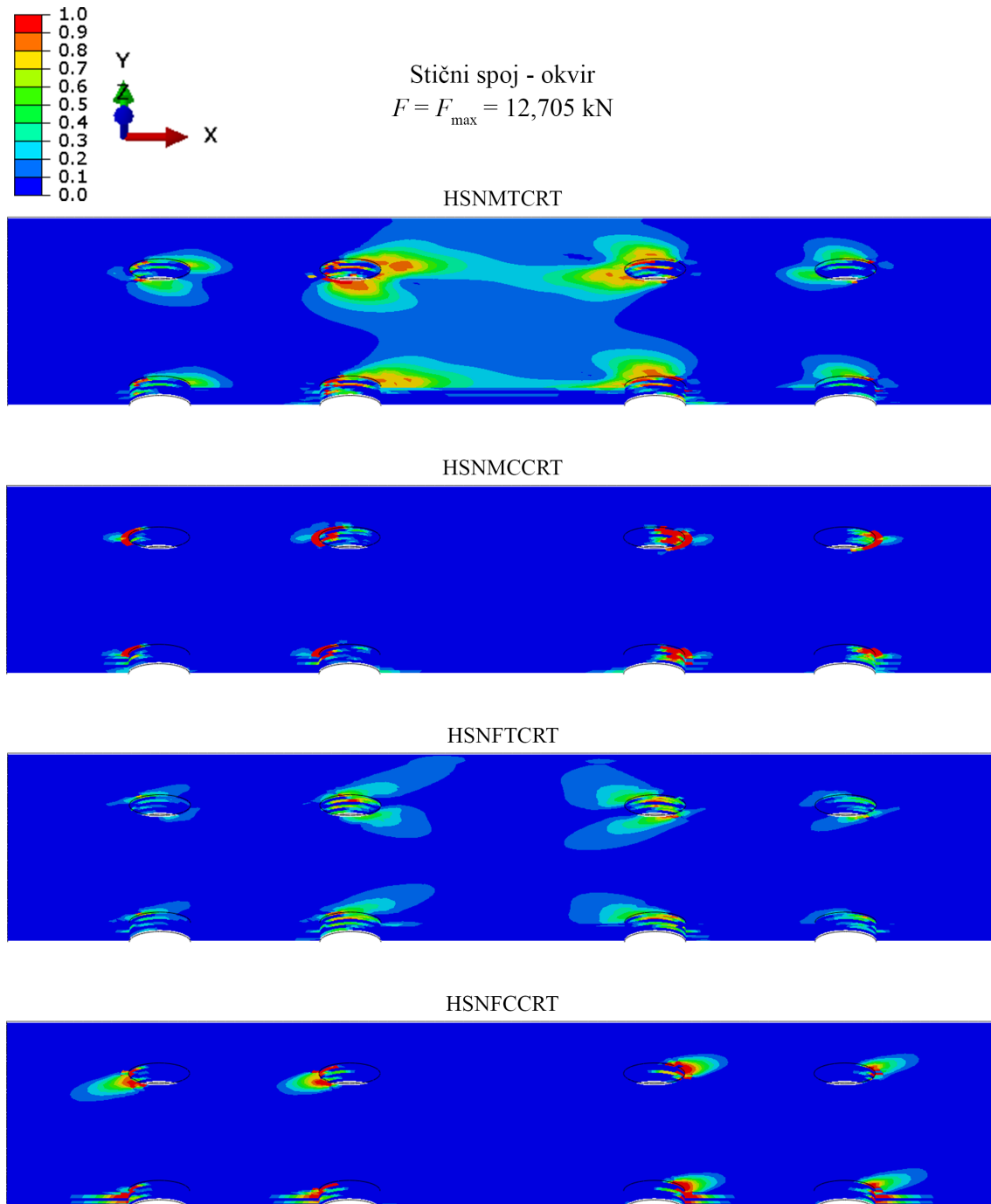


LaRC05 kriterij popuštanja matrice za okvir stičnog spoja na slici 7.28 pokazuje relativno velika područja na kojima je došlo do popuštanja a koja se nalaze oko unutrašnjih otvora na okviru. Zapaža se i popuštanje vlakana uslijed izvijanja i loma također na istim otvorima. Kriterij popuštanja za vlačno opterećenje vlakana još nije dosegao vrijednost jedan, a ima isto usmjerenje i lokaciju kao kriterij lom matrice.



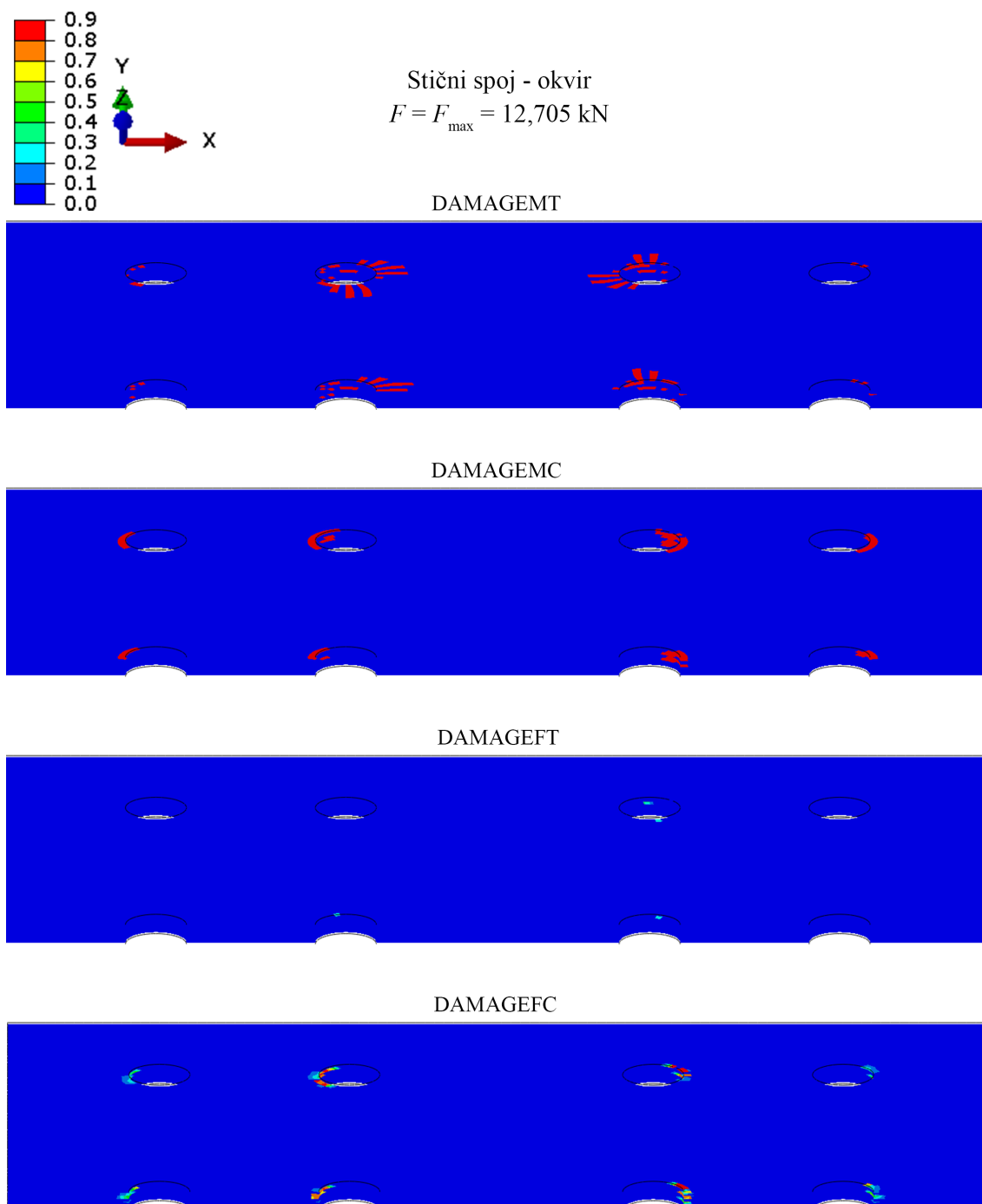
Slika 7.28: Raspodjela LaRC05 kriterija popuštanja na okviru stičnog spoja

Hashin-ov kriterij na slici 7.29 pokazuje veće zone popuštanja vlakna matrice na unutrašnjim otvorima čija se orijentacija poklapa s LaRC05 kriterijem popuštanja matrice. Matrica je popustila i uslijed tlaka, u manjoj magnitudi, na dijelovima okvira koje pritišću glave zakovica uslijed deformacije spoja panel-okvir. Vlakna su popustila na oba načina, s razlikom smjera popuštanja. Uslijed tlaka, vlakna su popustila u pozitivnom tj. negativnom smjeru  $y$  osi, dok će tlačno vrijednosti pratiti pravac  $x$  osi spoja.



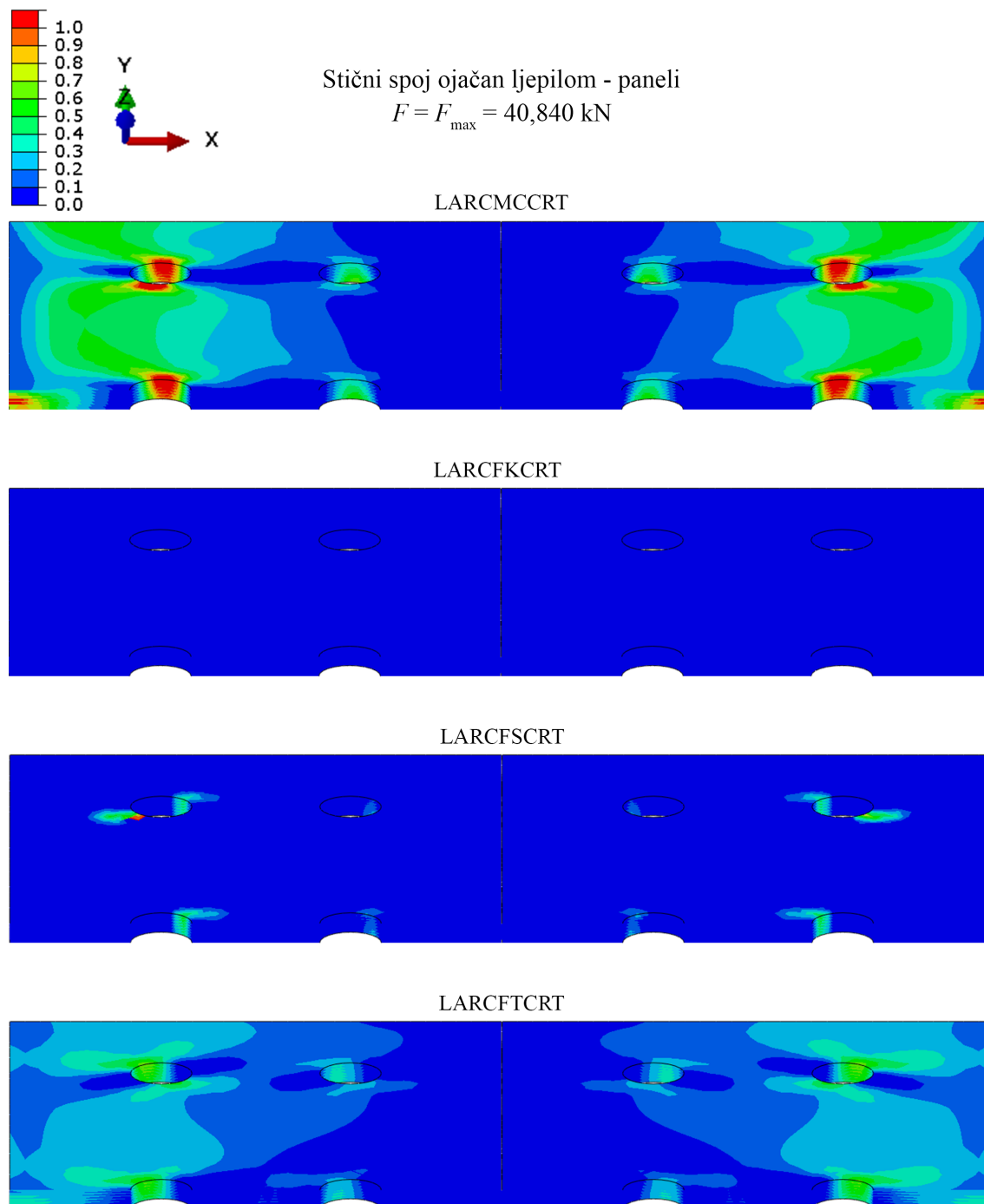
Slika 7.29: Raspodjela Hashin-ovog kriterija popuštanja na okviru stičnog spoja

DAMAGEMT varijabla pokazuje oštećenja matrice na lokacijama na kojima je Hashin-ov kriterij vlakna matrice dosegao kritične vrijednosti, a koje se radijalno šire prema okomitoj osi simetrije okvira. Matrica je tlačno popustila na površinama kojima također odgovaraju kritične vrijednosti Hashin-ovog kriterija. Vlakna su oštećena tlačno pa je to izlazna varijabla koja će diktirati brisanje elemenata. Raspodjela parametara oštećenja prikazana je na slici 7.30.



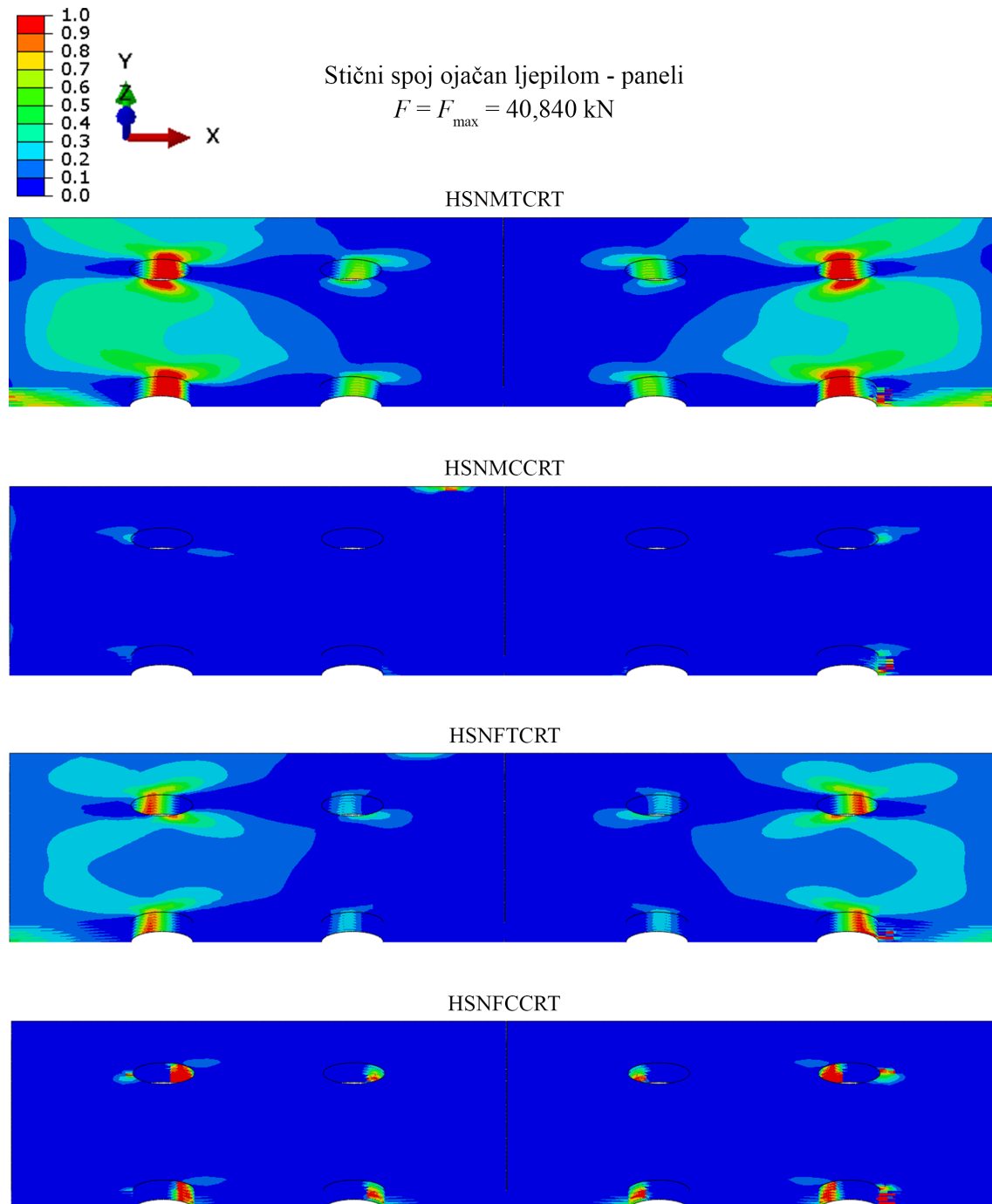
Slika 7.30: Raspodjela parametara oštećenja na okviru stičnog spoja

LaRC05 kriterij za panele stičnog lijepljenog spoja na slici 7.31 pokazuje popuštanje matrice kroz cijeli sloj panela iznad i ispod vanjskih otvora, s većim zonama vrijednosti između 0,5 i 0,7 također na područjima oko vanjskih otvora. Vlakna prema LaRC05 kriteriju nisu popustila, no postoje naznake da će napredovanjem pomaka doći do popuštanja uslijed vlačnog opterećenja i loma vlakana.



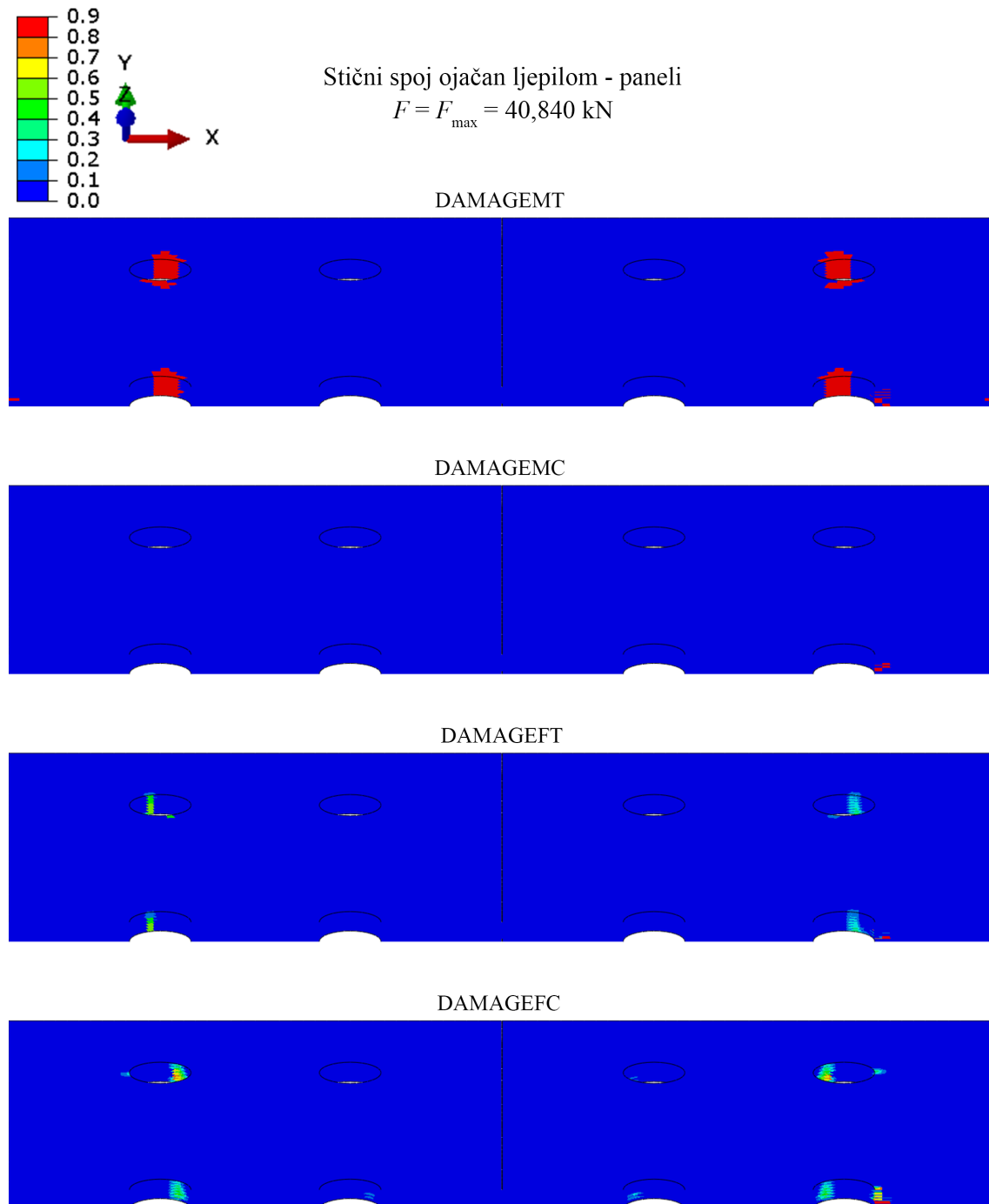
Slika 7.31: Raspodjela LaRC05 kriterija popuštanja na panelima ojačanog stičnog spoja

Hashin-ov kriterij prema slici 7.32 na panelima iskazuje veoma sličnu sliku popuštanja vlakna matrice onom LaRC-ovom. Prema Hashin-u matrica je popustila na vanjskim stupcima zakovica na lokacijama iznad i ispod otvora po cijeloj debljini panela. Na istim otvorima popustila su i vlakna na oba načina, s izuzetkom tlačnog kriterija koji kritične vrijednosti doseže i na unutarnjim stupcima zakovica.



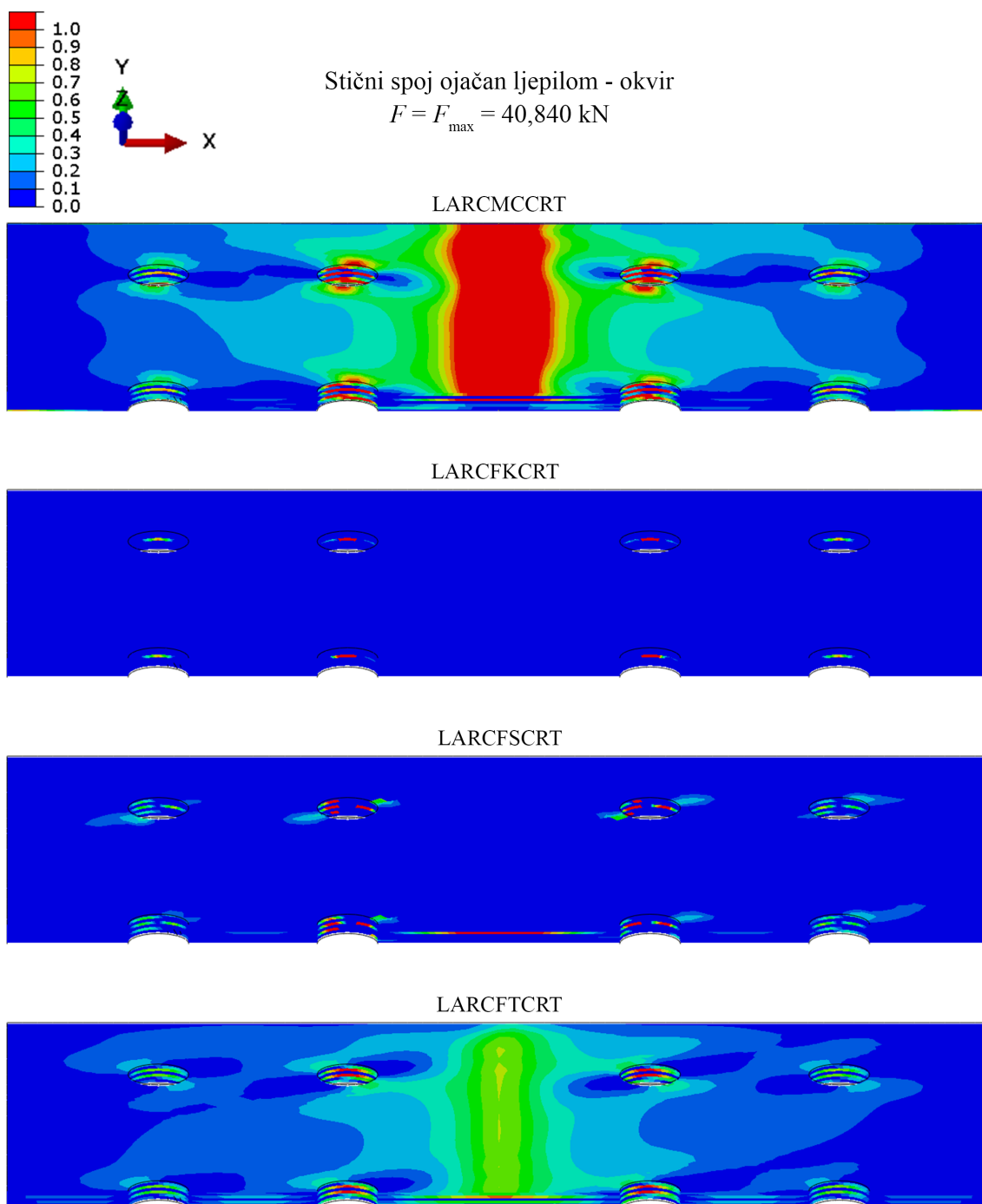
Slika 7.32: Raspodjela Hashin-ovog kriterija popuštanja na panelima ojačanog stičnog spoja

Oštećenja panela inicirana su samo na matrici uslijed vlakna. Vlakna su popustila tlačno na otvoru u slojevima  $+45^\circ$  i  $-45^\circ$ . Raspodjela oštećenja prikazana je na slici 7.33 gdje je vidljivo oštećenje matrice na gornjim stranama otvora označeno crvenom bojom.



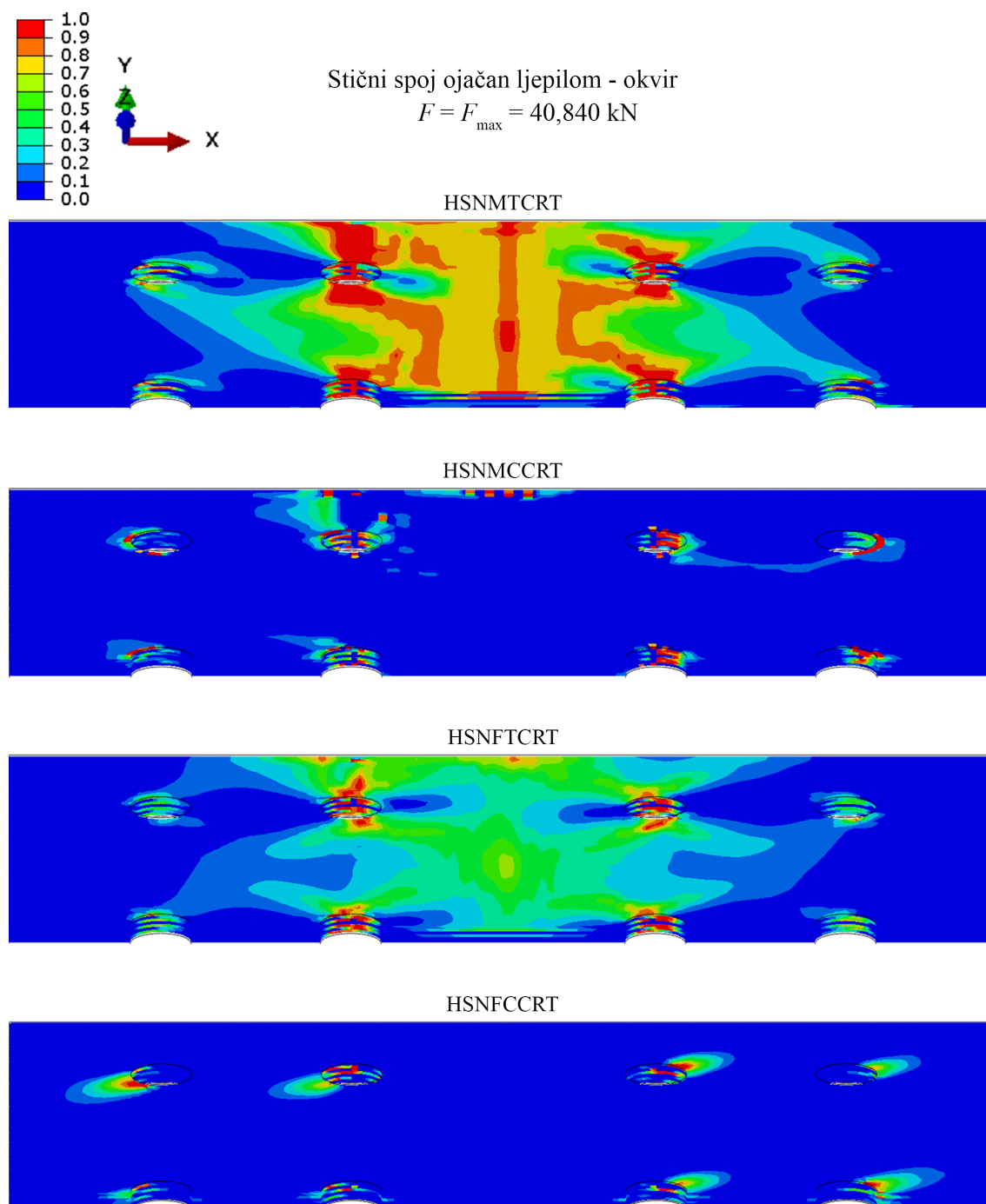
Slika 7.33: Raspodjela parametara oštećenja na panelima ojačanog stičnog spoja

Na slici 7.34 popuštanje matrice prema LaRC05 kriteriju ukazuje na veliko područje popuštanja na slojevima okvira od +45 i 0 stupnjeva na strani dodira s panelima te oko unutrašnjih otvora. Minorna su oštećenja uslijed izvijanja i loma vlakana s izuzetkom loma vlakana na sloju od 90 stupnjeva koji je popustio po sredini, dok je popuštanje vlačnog opterećenja vlakana doseglo maksimalne iznose na gornjoj i donjoj strani unutrašnjih otvora.



Slika 7.34: Raspodjela Larc05 kriterija popuštanja na okviru ojačanog stičnog spoja

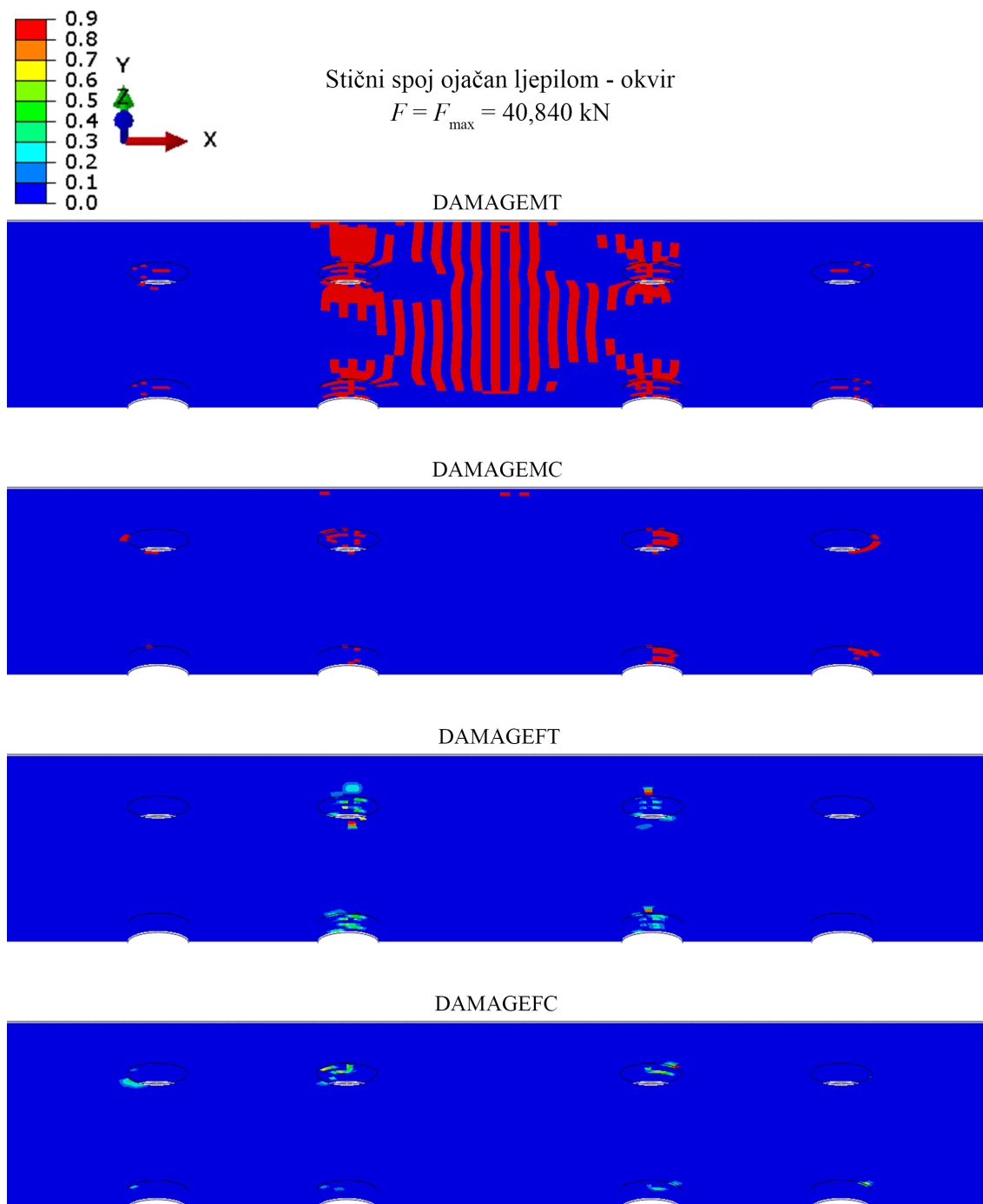
Hashin-ov kriterij vlaka matrice prema slici 7.35 indicira na istu sliku popuštanja kao i LaRC05 kriterij popuštanja matrice. Kriterij vlačnog opterećenja vlakana nalazi se također na sredini površine panela a kritične vrijednosti dosegaio je na unutrašnjim stupcima iznad i ispod otvora. Zona kritične vrijednosti veća je na lijevom stupcu zakovica, i to na onom na kojem se događa krhki lom u sljedećem koraku simulacije. Tlačni kriteriji također ukazuju na popuštanje slojeva, no u manjim razmjerima nego dva prethodno opisana kriterija.



Slika 7.35: Raspodjela Hashin-ovog kriterija popuštanja na okviru ojačanog stičnog spoja



Prema *DAMAGEMT* varijabli prikazanoj na slici 7.36 postoje zamjetno oštećene zone između dva unutarnja stupca otvora i oko samih otvora na kojima je došlo do oštećenja. Tlačno oštećena područja vertikalno su usmjerena duž cijele visine okvira. Matrica je uslijed tlaka oštećena iznad i ispod svih otvora, s većim oštećenjima na posljednja dva stupca zakovica. Jasno je vidljivo da je u tijeku propagacija oštećenja vlakana uslijed vlaka, a koje je najizraženije na drugom stupcu zakovica gdje i dolazi do potpunog loma spoja.



Slika 7.36: Raspodjela parametara oštećenja na okviru ojačanog stičnog spoja

## Zaključak

U ovom radu izvršena je usporedba Hashin i LaRC05 kriterija i pripadajućih modela oštećivanja, a numerički modeli su validirani usporedbom s eksperimentima. Eksperiment je proveden na epruveti izrađenoj od preprega CCF800/AC531 kompozita s otvorenim provrtom na kidalici prema normi ASTM D5766-02. Na kidalicu je primijenjen pomak od 1 mm/min. LaRC05 kriterij koristi XFEM numeričku metodu koja služi za proračun propagacije pukotine i kojom se konzekventno dobiva degradacija krutosti u materijalu. Ovaj kriterij trenutno je primjenjiv samo u Abaqus/Standard solveru. Provedbom više iteracija modela zaključuje se da ovakvu implementaciju LaRC05 kriterija popuštanja nije moguće u potpunosti primijeniti na realne geometrije koje koriste složenije slojeve kompozita. Razlog tome je što prilikom napredovanja oštećenja tj. pukotine u materijalu, simulacija prekine zbog greške nivo skupa, a koja se manifestira ulaskom dviju pukotina u jedan element, kao što je to slučaj na otvoru epruvete koja je korištena za validaciju. Ovakvu grešku pokušalo se eliminirati prilagodbom koeficijenata viskoznosti i ograničavanjem oslobođene energije loma ne bi li se stabilizirao rast pukotine no bez uspješnih rezultata. Greška je pak eliminirana kada je LaRC05 kriterij primijenjen na jednostavniji raspored slojeva već jednostavne geometrije. Stoga se javlja pitanje efektivnosti trenutnih mogućnosti ovog kriterija korištenjem pretprocesora Abaqus/CAE. S obzirom na sve navedeno, daljnja analiza rezultata provedena je s ekstremima simulacija dobivenih u Abaqus/Explicit-u za Hashin-ov kriterij. U rezultatima validacijskog modela primijećena je razlika u krutosti, dok razlika između eksperimentalnih i numeričkih rezultata iznosi 8,98 %, a slike popuštanja pokazuju odgovarajuće poklapanje za usporedive načine popuštanja u kriterijima, s konzervativnijim rezultatima dobivenim kroz Hashin-ov kriterij. U drugom dijelu numeričkog proračuna uspoređene su tri vrste zakovičnih spojeva po uzoru na spojeve između dviju sekcija trupa aviona. Lijepljeni stični spoj pokazao se kao superiornija alternativa običnom stičnom i preklopnom spoju s maksimalnom silom većom za 257% odnosno 221% i nezamjetnom promjenom u masi. Dok je lijepljeni stični doživio krhki lom, ostala su dva spoja nakon maksimuma sile pala u nestabilno

područje za koje je očito da u realnoj situaciji ne bi uznapredovalo do te razine kao što je to slučaj u simulaciji. U obje varijante stičnog spoja, stičnica, tj. okvir, odnosno dio koji predstavlja okvir trupa aviona, pokazao se kao izvorno mjesto popuštanja spojeva, s dva mehanizma popuštanja, *Shear Out* za obični stični i *Net-tension Failure* za ojačani lijepljeni spoj. Uspoređujući slike popuštanja za LaRC05 i Hashin-ov kriterij, moguće je zamijetiti slične raspodjele popuštanja u magnitudi i usmjerenju s neprimjetno većim odstupanjima kod LaRC05 kriterija. Kao daljnja evaluacija i nadogradnja iznesenih rezultata, u ovom radu preporuča se optimizacija slojeva kompozita, usporedba dodatnih izvedbi zakovičnih spojeva i evaluacija alternativa zakovičnim spojevima.

## Literatura

- [1] A S Kaddour i Mike Hinton. „Maturity of 3D failure criteria for fibre-reinforced composites: Comparison between theories and experiments: Part B of WWFE-II”. *Journal of Composite Materials* 47 (ožujak 2013.), str. 925–966.
- [2] Midori Y. Pitanga i dr. „Reducing repair dimension with variable scarf angles”. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 104 (2021.), str. 102752. ISSN: 0143-7496.
- [3] László P. Kollár i George S. Springer. *Mechanics of Composite Structures*. Cambridge University Press, 2003.
- [4] *ASM Handbook, Volume 21: Composites*. ASM International, 2024.
- [5] Baikowski. *CMC - Ceramic Matrix Composite — properties & benefits*. Pristupljeno: 2024-09-26. 2024. URL: <https://www.baikowski.com/en/cmc-ceramic-matrix-composite-page/>.
- [6] West Star Aviation. *West Star Aviation Integrates Carbon Fiber into Aircraft*. Pristupljeno: 2024-09-26. 2024. URL: <https://www.weststaraviation.com/news/west-star-aviation-integrates-carbon-fiber-into-aircraft/>.
- [7] M. Masuelli. „Introduction and Background of Fiber-Reinforced Composite Materials”. *Fiber Reinforced Polymers: The Technology Applied for Concrete Repair*. Springer, 2024., str. 1–30.
- [8] John Carroll i David Hurst. *Introduction to Aerospace Materials*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2010.
- [9] Managing Composites. *Properties of Composites Materials Strain Stress Curve*. Pristupljeno: 2024-09-27. 2022. URL: <https://managingcomposites.com/2022/07/28/properties-composites-materials-strain-stress-curve/>.
- [10] „Hexcel launches new HexTow carbon fiber”. *Reinforced Plastics* (2024.). Pristupljeno: 2024-09-29. URL: <https://www.reinforcedplastics.com/content/news/hexcel-launches-new-hextow-carbon-fiber>.

- [11] Garima Mittal i dr. „Reinforcements in multi-scale polymer composites: Processing, properties, and applications”. *Composites Part B: Engineering* 138 (2018.), str. 122–139.
- [12] Hexcel Corporation. *Carbon Fiber Data Sheet*. Pristupljeno: 2024-09-29. 2024. URL: <https://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Carbon-Fiber>.
- [13] Jonathan Awerbuch i H. Thomas Hahn. „Fatigue and Proof-Testing of Unidirectional Graphite/Epoxy Composite”. *ASTM special technical publications* (1977.), str. 248–266.
- [14] *Standard Specification for Glass Fiber Strands*. ASTM International, 2018.
- [15] Trevor Starr. *Glass Fibre Directory and Databook*. London: Springer, 1999.
- [16] *High Strength Glass Fiber S2 Glass Roving*. <https://porter36.en.made-in-china.com/product/yxTRrGp0IzcA/China-High-Strength-Glass-Fiber-S2-Glass-Roving.html>. Pristupljeno: 2024-09-30.
- [17] *Alkex Para-Aramid*. <https://www.rocket-fibers.com/products/alkex-para-aramid>. Pristupljeno: 2024-09-30.
- [18] Clarence C. Poe. *NASA Applications of Advanced Composite Materials for Large Structures*. Teh. izv. NASA/TM-2014-02341. NASA Langley Research Center, 2013.
- [19] NASA. *STS-3 Infrared on Reentry*. [https://en.wikipedia.org/wiki/Space\\_Shuttle\\_thermal\\_protection\\_system#/media/File:STS-3\\_infrared\\_on\\_reentry.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Space_Shuttle_thermal_protection_system#/media/File:STS-3_infrared_on_reentry.jpg). Pristupljeno: 2024-09-30.
- [20] *Epoksidna Smola*. <http://struna.ihjj.hr/naziv/epoksidna-smola/5795/>. Pristupljeno: 2024-09-30.
- [21] Hexcel Corporation. *Hextow Laminate Properties in HexPly 8552*. Pristupljeno: 2024-10-01. 2024. URL: <https://www.hexcel.com/Products/Resources/1664/hextow-laminate-properties-in-hexply-8552>.
- [22] DIC Corporation. *Phenolic Epoxy Resin*. Pristupljeno: 2024-10-01. 2024. URL: [https://www.dic-global.com/en/products/epoxy/phenol\\_mn/](https://www.dic-global.com/en/products/epoxy/phenol_mn/).
- [23] Dark Aero. *Five Things to Know About Carbon Fiber*. Pristupljeno: 2024-10-01. 2024. URL: <https://www.darkaero.com/knowledge/composites/five-things-to-know-about-carbon-fiber/>.
- [24] Ramesh Talreja i Chandra Veer Singh. *Damage and Failure of Composite Materials*. 1st. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.

- [25] E. K. Gamstedt i B. A. Sjögren. „Micromechanisms in Tension-Compression Fatigue of Composite Laminates Containing Transverse Plies”. *Composites Science and Technology* 59 (1999.), str. 167–178.
- [26] C. A. Wood i W. L. Bradley. „Determination of the Effect of Seawater on the Interfacial Strength of an Interlayer E-Glass/Graphite/Epoxy Composite by In Situ Observation of Transverse Cracking in an Environmental SEM”. *Composites Science and Technology* 57 (1997.), str. 1033–1043.
- [27] Mark McElroy i dr. „Interaction of delaminations and matrix cracks in a CFRP plate, Part I: A test method for model validation”. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 103 (2017.), str. 314–326.
- [28] D. K. Hsu i K. M. Uhl. „A Morphological Study of Porosity Defects in Graphite-Epoxy Composite”. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*. Ur. D. O. Thomson i D. E. Chimenti. Sv. 6B. New York: Plenum Press, 1986., str. 1175–1184.
- [29] Delia Brauer i dr. „Degradable phosphate glass fiber reinforced polymer matrices: Mechanical properties and cell response”. *Journal of materials science. Materials in medicine* 19 (veljača 2008.), str. 121–7.
- [30] A. Kabiri Ataabadi, H. Hosseini-Toudeshky i S. Ziaei Rad. „Experimental and analytical study on fiber-kinking failure mode of laminated composites”. *Composites Part B: Engineering* 61 (2014.), str. 84–93.
- [31] Silvestre Pinho i dr. „Material and structural response of polymer-matrix fibre-reinforced composites”. *Journal of Composite Materials* 46 (rujan 2012.), str. 2313–2341.
- [32] Dennis Wilhelmsson. „THESIS FOR THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY IN SOLID AND STRUCTURAL MECHANICS - Compressive failure of unidirectional NCF composites”. Disertacija. Ožujak 2019.
- [33] Z. Hashin i A. Rotem. „A Fatigue Failure Criterion for Fiber Reinforced Materials”. *Journal of Composite Materials* 7.4 (1973.), str. 448–464.
- [34] Z. Hashin. „Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites”. *ASME Journal of Applied Mechanics* 47.2 (1980.), str. 329–334.
- [35] S.T. Pinho, L. Iannucci i P. Robinson. „Physically-based failure models and criteria for laminated fibre-reinforced composites with emphasis on fibre kinking: Part I: Development”. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 37.1 (2006.), str. 63–73.

- [36] S. T. Pinho i dr. *Failure models and criteria for FRP under in-plane or three-dimensional stress states including shear non-linearity*. Teh. izv. NASA/TM-2005-213530. NASA Langley Research Center, 2005.
- [37] Dassault Systemes Simulia Corp. *ABAQUS User's Manual 2024*.
- [38] Gihwan Kim i Phill-Seung Lee. „Mesh coarsening using the phantom-node method in the phase field model”. *Finite Elements in Analysis and Design* 228 (2024.), str. 104048.
- [39] Sagheer Ranjha. „Effect of head wear on rail overhead radius stresses and fracture under high axle load conditions”. Disertacija. Prosinac 2013.
- [40] American Society for Testing and Materials. *Test Method for Open-Hole Tensile Strength of Polymer Matrix Composite Laminates*. ASTM D5766-02. ASTM International, 2002.
- [41] Di Zhang i dr. „A comparative study on failure mechanisms of open-hole and filled-hole composite laminates: Experiment and numerical simulation”. *Thin-Walled Structures* X (2024.), str. 111730.
- [42] J. Llobet i dr. „A continuum damage model for composite laminates: Part IV - experimental and numerical tests”. *Mechanics of Materials* (2021.).
- [43] Mehdi Yari. *Galvanic Corrosion of Metals Connected to Carbon Fiber Reinforced Polymers*. Pristupljeno: 2025-01-10. 2021. URL: <https://www.corrosionpedia.com/galvanic-corrosion-of-metals-connected-to-carbon-fiber-reinforced-polymers/2/1556>.
- [44] MatWeb, LLC. *Steel PH17*. Pristupljeno: 2025-01-3. 2025. URL: <https://www.matweb.com>.
- [45] J. A. Bailie, R. P. Ley i A. Pasricha. *A Summary and Review of Composite Laminate Design Guidelines*. Teh. izv. Northrop Grumman Corporation, Military Aircraft Systems Division, 1997.
- [46] R. Sachse i dr. „Experimental and numerical investigation of the influence of rivetless nut plate joints on fatigue crack growth in adhesively bonded composite joints”. *International Journal of Fatigue* 105 (2017.), str. 262–275. ISSN: 0142-1123.