

Numerička analiza konstrukcije poda helikoptera pri udaru o tlo

Klapač, Josip

Master's thesis / Diplomski rad

2015

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:235:151242>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-18**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Josip Klapač

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Ivica Smojver

Student:

Josip Klapač

Zagreb, 2015.

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

Zahvaljujem se svom mentoru, prof. dr.sc. Ivici Smojveru na stručnom vodstvu prilikom izrade ovog diplomskog rada. Veliko hvala dr.sc. Darku Ivančeviću na stručnoj pomoći pri upotrebi programa Abaqus, te na svim savjetima u vezi izrade samog diplomskog rada. Na kraju, hvala roditeljima na svojoj podršci i prije svega, strpljenju tijekom cijelog studija.

Josip Klapač



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Josip Klapač** Mat. br.: 0135201660

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Numerička analiza konstrukcije poda helikoptera pri udaru o tlo**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Numerical Analysis of the Helicopter Floor Structure at Ground Impact**

Opis zadatka:

Izvršiti numeričku analizu udara o tlo konstrukcije poda helikoptera pri vertikalnim brzinama koje odgovaraju realnim vrijednostima. Numerički model podne konstrukcije treba izraditi prema dostupnoj literaturi s pojednostavljenom geometrijom. Pri modeliranju treba uzeti u obzir i sjedala pilota te vodilice sjedala. U radu varirati početnu vertikalnu brzinu helikoptera pri udaru o tlo.

U prvoj fazi rada potrebno je provesti validaciju numeričkog modela usporedbom rezultata s numeričkim ili eksperimentalnim podacima udara metalnih helikopterskih konstrukcija dostupnih u literaturi. Metalnu podnu konstrukciju modelirati kao elastoplastičnu, a parametre konstitutivnih modela materijala koristiti prema dostupnoj literaturi. Pri zadavanju konstitutivnog modela treba uzeti u obzir i odgovarajuće kriterije popuštanja. U numeričkom modelu je potrebno postaviti početne i rubne uvjete koji će rezultirati realnim brzinama i ubrzanjima pri padu helikoptera.

Nakon validacije numeričkog pristupa, u drugoj fazi rada je potrebno usporediti analize metalne i kompozitne konstrukcije poda helikoptera koja je izrađena od kompozitnih materijala uobičajenih u zrakoplovnim konstrukcijama (CFRP, *sandwich* konstrukcije). Pri modeliranju kompozitnih materijala koristiti Hashin-ov kriterij popuštanja i model postupnog oštećivanja materijala. Na temelju dobivenih rezultata procijeniti preživljivost posade helikoptera.

U radu koristiti programe za računalno modeliranje, a numeričku analizu izvršiti korištenjem programa Abaqus/Explicit.

U radu navesti korištenu literaturu te eventualnu dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

24. rujna 2015.

Rok predaje rada:

26. studenog 2015.

Predviđeni datumi obrane:

2., 3. i 4. prosinca 2015.

Zadatak zadao:


Prof. dr. sc. Ivica Smojver

Predsjednica Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1 UVOD	1
2 Validacija numeričkog modela za aluminijsku konstrukciju poda helikoptera	4
2.1 CAD model.....	4
2.2 Numerički model poda helikoptera	7
2.3 Početni i rubni uvjeti.....	9
2.4 Materijalni model	10
2.5 Eksperimentalna postava ispitivanja prema [2].....	11
2.6 Rezultati analize i usporedba sa podacima iz literature.....	12
3 Kompozitna konstrukcija i numerička analiza	24
3.1 Numerički kompozitni model konstrukcije	24
3.2 Materijalni model	27
3.3 Hashinov kriterij popuštanja.....	28
3.4 Rezultati simulacija kompozitnog materijala	32
4 Eiband krivulje	43
5 Zaključak.....	47
Literatura	49
PRILOZI.....	50

POPIS SLIKA

Slika 1.	KRASH model Sikorsky ACAP konceptnog helikoptera [1].....	2
Slika 2.	Eksperimentalna i numerička analiza Sikorsky ACAP [1].....	2
Slika 3.	Westland WG30, Velika Britanija[1]	4
Slika 4.	Segment konstrukcije poda između okvira STN1710F i STN450F koja se ispituje u [1] i [2]	5
Slika 5.	CAD Model izrađen programu <i>Solidworks</i>	6
Slika 6.	Numerički model poda konstrukcije sa označenim debljinama presjeka [crveno 1.5 mm, sivo 0.7 mm, plavo 1.9 mm, zeleno 2 mm, tamno sivo 2.1 mm].....	7
Slika 7.	Prikaz rubnih i početnih uvjeta numeričkog modela	8
Slika 8.	Mreža konačnih elemenata modela konstrukcije poda helikoptera	8
Slika 9.	Prikaz testne platforme za ispitivanje vertikalnog udara konstrukcije [2].....	11
Slika 10.	Shematski prikaz segmenata konstrukcije poda helikoptera.....	12
Slika 11.	Čvorovi (crveno) na gornjoj ploči na kojima se mjerio pomak, brzina i ubrzanje u analizi	14
Slika 12.	Ekvivalentna Von Mises naprezanja na kraju simulacije (25 ms.....	15
Slika 13.	Ekvivalentna plastična deformacija na kraju simulacije (25 ms realnog vremena).	15
Slika 14.	Detalji deformacije modela. a) sredina konstrukcije, spoj okvira V0 i STN1080F, b) prikaz ruba konstrukcije (okvir STN1710F).[Ekvivalentna Von Mises naprezanja]	16
Slika 15.	Usporedba ponašanja spoja okvira poda helikoptera u eksperimentalnoj [2] i numeričkoj analizi [Ekvivalentna Von Mises naprezanja]	16
Slika 16.	Ponašanje rubnog zakrivljenog dijela okvira STN1710F, eksperimentalno [2] i numerički	16
Slika 17.	Pomaci točke mjereni na krutoj ploči.....	17
Slika 18.	Brzine mjerene na krutoj ploči	17
Slika 19.	Ubrzanja mjerena na krutoj ploči	18
Slika 20.	Promjena kinetičke energije numeričkog modela i usporedba s vrijednostima iz [3]	19
Slika 21.	Promjena ukupne energije numeričkog modela i usporedba sa [3].....	19
Slika 22.	Promjena unutarnje energije numeričkog modela i usporedba sa [2]	19
Slika 23.	Raspodjela ekvivalentnog Von Mises naprezanja aluminijskog modela [MPa] 21	

Slika 24. Raspodjela ekvivalentnih plastičnih deformacija u aluminijskom modelu [mm/mm]	22
Slika 25. Implementacija modela sjedala u aluminijski model konstrukcije poda helikoptera	23
Slika 26. Podaci o ubrzanjima u preliminarnim analizama konstrukcije sa sjedalima	23
Slika 27. Postava numeričke simulacije sa kompozitnom konstrukcijom	24
Slika 28. Prikaz modela kompozitne konstrukcije sa definiranim lokalnim koordinatnim sustavima i sekcijama različitog presjeka [Zeleno 5 slojeva, crveno 20 slojeva, plavo 22 sloja ugljičnim vlaknima ojačane epoksidne smole]	25
Slika 29. Mreža konačnih elemenata kompozitnog modela	26
Slika 30. Hookeov dijagram za vlaknima ojačane kompozite [5]	31
Slika 31. Energije u preliminarnim analizama kompozitnog modela	33
Slika 32. Problemi sa mrežom konačnih elemenata u preliminarnim analizama. Konture prikazuju vrijednosti Hashinovog kriterija popuštanja vlakana pri tlačnom opterećenju na kraju analize.	33
Slika 33. Energije u preliminarnim kompozitnim analizama	34
Slika 34. Iznosi energija u analizi kompozitnog modela	34
Slika 35. Dijagram usporedbe smanjenja brzine kompozitnog i aluminijskog modela	35
Slika 36. Dijagram usporedbe vertikalnog pomaka ploče na kompozitnom i aluminijskom modelu	35
Slika 37. Ubrzanje točke ploče na kompozitnoj i aluminijskoj konstrukciji	36
Slika 38. Prosječno ubrzanje za kompozitni model	36
Slika 39. Raspodjela ekvivalentnog Von Mises naprežanja u određenim trenucima analize kompozitnog modela [MPa]	38
Slika 40. Vrijednosti indeksa Hashinovog kriterija tlačnog popuštanja vlakna u donjim slojevima materijala konstrukcije	39
Slika 41. Vrijednosti indeksa Hashinovog kriterija vlačnog popuštanja vlakna u donjim slojevima materijala konstrukcije	40
Slika 42. Vrijednosti indeksa Hashinovog kriterija tlačnog popuštanja matrice u donjim slojevima materijala konstrukcije	41
Slika 43. Vrijednosti indeksa Hashinovog kriterija vlačnog popuštanja matrice u donjim slojevima materijala konstrukcije	42
Slika 44. Vrijednosti indeksa Hashinovog kriterija nastajanja vlačnog oštećenja matrice u donjim slojevima materijala konstrukcije (25 ms analize)	43

Slika 45.	Trokutasti impulsni signal udara [11]	43
Slika 46.	Koordinatni sustav čovjeka i sile ubrzanja na tijelo [11].....	44
Slika 47.	Eiband krivulja za +Gz akceleraciju [11].....	45

POPIS TABLICA

Tablica 1	Dijelovi konstrukcije poda helikoptera [1].....	5
Tablica 2.	Podaci o mreži konačnih elemenata	9
Tablica 3.	Podaci za materijal Al-2014 [3]	10
Tablica 4.	Pojedinosti izdvojenih simulacija.....	13
Tablica 5.	Mreža konačnih elemenata kompozitnog modela	26
Tablica 6.	Tablica rasporeda i broja slojeva materijala.....	27
Tablica 7.	Mehanička svojstva ugljičnim vlaknima ojačane epoksidne smole [8]	27
Tablica 8.	Parametri čvrstoće ugljičnim vlaknima ojačane epoksidne smole [7]	27
Tablica 9.	Tablica ljudskih tolerancija na g opterećenja [11]	45

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
C_a		matrica elastičnosti elemenata
d_f		parametar oštećenja vlakana
d_m		parametar oštećenja matrice
d_s		parametar posmičnog oštećenja
E	GPa	Modul elastičnosti izotropnog materijala
$E_i, i=1,2,3$	GPa	Modul elastičnosti u pravcu glavnih materijalnih osi
G	GPa	Modul smicanja izotropnog materijala
$G_{ij}, i,j=1,2,3$	GPa	Moduli smicanja s obzirom na glavne materijalne osi
M		Matrica operatora oštećenja
X^T	MPa	Vlačna čvrstoća u smjeru vlakana
X^C	MPa	Tlačna čvrstoća u smjeru vlakana
Y^T	MPa	Vlačna čvrstoća u smjeru okomitom na smjer vlakana
Y^C	MPa	Tlačna čvrstoća u smjeru okomitom na smjer vlakana
S	MPa	Smična čvrstoća
α		Koeficijent doprinosa posmičnih naprezanja u nastajanju oštećenja vlakna pri vlačnom opterećenju
ε		Tenzor deformacija
ρ	kg/m ³	Gustoća
$\nu_{ij}, i,j=1,2,3$		Poissonovi koeficijenti s obzirom na glavne materijalne osi
$\hat{\sigma}$		Efektivni tenzor naprezanja
σ	N/m ²	Nominalno naprezanje

SAŽETAK

Ovaj se rad bavi numeričkom analizom konstrukcije poda helikoptera pri udaru o tlo. Validacija numeričkog modela aluminijske konstrukcije vršena je podacima iz literature iz kojih je za primjer uzeta konstrukcija poda helikoptera Westland WG30. Analiza se vrši u programu Abaqus/Explicit.

U prvom poglavlju je objašnjena povijest upotrebe numeričkih analiza u simulacijama udara te pristup daljnjem radu.

U drugom poglavlju vrši se validacija numeričkog modela aluminijske konstrukcije poda helikoptera, u kojem je objašnjen geometrijski model, numerički materijalni model s pripadajućom mrežom konačnih elemenata te dobiveni rezultati.

U trećem poglavlju vrši se izrada numeričkog modela kompozitne konstrukcije helikoptera na temelju aluminijske konstrukcije iz prvog dijela. Objašnjeni su načini popuštanja prema Hashinovom kriteriju, te dobiveni rezultati.

U četvrtom poglavlju ukratko su objašnjene Eiband krivulje, odnosno krivulje ljudskih tolerancija na G opterećenja.

U zadnjem poglavlju dan je kratak zaključak obzirom na preživljivost posade i putnika iz dobivenih rezultata te komentari numeričkih modela konstrukcije poda helikoptera.

Ključne riječi:

Numerička analiza, konstrukcija poda helikoptera, Hashinov kriterij popuštanja, Eiband krivulje.

SUMMARY

The subject of this Thesis is numerical analysis of the helicopter floor structure at ground impact.

Validation of the numerical model of aluminum floor structure has been made by comparison with the data found in literature, from which the floor structure of Westland WG30 helicopter has been taken. The analysis has been performed in Abaqus/Explicit.

The history of numerical analyses in crashworthiness applications has been introduced in the first chapter. In addition, the methodology followed in this Thesis has been explained in this chapter.

The second chapter deals with validation of the numerical model of aluminum helicopter floor structure. The geometrical model, numerical Finite Element model and the employed material model have been explained in this Chapter. In addition, the obtained results have been shown.

The third chapter deals with the numerical model of the composite floor structure which is based on the model introduced in the second chapter. The principles of Hashin failure criteria have been explained and the obtained results have been provided.

The fourth chapter briefly explains the Eiband curves, i.e. human crash tolerance curves.

In the last chapter, a short conclusion has been made regarding pilots and passengers crash survivability based on the results obtained in chapters two and three. Conclusions on the numerical floor structure models have been also provided in this chapter.

Key words:

Numerical analysis, helicopter floor structure, Hashin failure criteria, Eiband curves.

1 UVOD

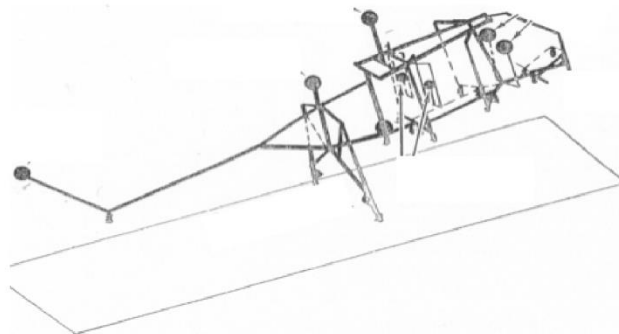
Konstruiranje helikoptera s naglaskom na veću otpornost pri udaru o tlo počelo je tijekom 60-tih godina prošlog stoljeća, prikupljajući podatke o preživljivosti posada i reakciji konstrukcije zrakoplova pri udaru. Daleko najvažniji bili su podaci o vojnim helikopterima, s čijim je podacima došlo do razvoja *Crash survival design guide* (Vodiča za konstruiranje s ciljem povećanja preživljivosti posade) 1965. godine [1].

Podaci iz tog vodiča postali su dijelom američkog vojnog standarda MIL-STD-1290A, koji propisuje implementaciju inicijalnih uvjeta za dizajn i konstrukciju letjelica otpornih na udar o tlo. Standard je definirao kriterij da pri određenim brzinama udara, konstrukcija trupa zrakoplovane deformira više od 15%, čime bi se povećala preživljivost posade. Brzina pri kojoj se to odnosi, za vertikalni udar, kod helikoptera s izvučenim podvozjem iznosi 12.6 m/s, dok kod uvučenog podvozja brzina udara iznosi 8 m/s. Stoga, možemo reći da uzimamo 8 m/s kao referentu vrijednost prilikom analize udara konstrukcije poda o tlo. Osim same konstrukcije poda helikoptera, prilikom konstruiranja helikoptera otpornog na udar, potrebno je uzeti u obzir i ostale dijelove koje na određeni način postupno smanjuju kinetičku energiju udara, odnosno smanjuju energiju koje tijelo pilota i putnika absorbira pri udaru. Razvijena su sjedala koja smanjuju *g*-sile koje pilot osjeća prilikom udara dovodeći ta ubzanja u područje koje je preživljivo za ljudsko tijelo. Problem prilikom absorpcije energije udara predstavlja jako malo mala visina konstrukcije, kojom se može absorbirati udar. Kod helikoptera, prosječna visina od vanjskog poda helikoptera do unutrašnje površine na kojoj se nalaze vodilice sjedala iznosi 200 mm. U tih 200 mm potrebno je brzinu udara od najmanje 8 m/s svesti tako da *g*-sile na tijelo pilota budu što manje. Konstrukcija dakle mora absorbirati kinetičku energiju udara na što povoljniji način.

Tijekom godina, analiziranje konstrukcija vršeno je eksperimentalnim pristupom pri kojem se cijela letjelica slobodnim padom „bacala“ sa određene visine simulirajući odgovarajuće brzine udara. Takav pristup zahtijevao je poprilična financijska sredstva. Također, zbog same prirode testiranja, nije se moglo ponavljati testiranje na istom modelu za različite režime udara. Razvojem računalne tehnike, došao je i razvoj programa za numeričku analizu konstrukcija pri udarnim opterećenjima. Prvi takav razvijen je u *Lockheed-California Company*, 1974. nazvan KRASH. KRASH je programski kod koji preko štapnih elemenata, koncentriranih masa i opružnih elemenata definira konstrukciju letjelice te se na temelju ekperimentalno

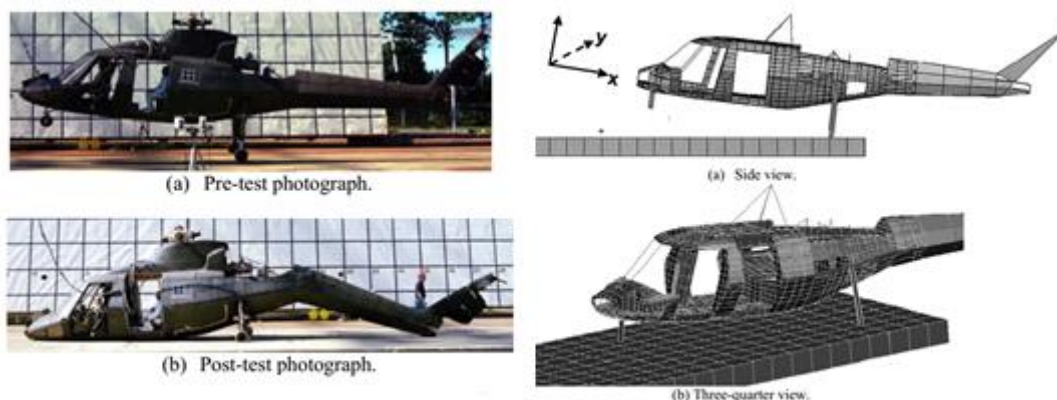
prikupljenih podataka napravi numerički model te simulira odziv prilikom udara. Slika 1 prikazuje numerički model Sikorsky ACAP helikoptera u KRASH-u [1].

U isto vrijeme na Lawrence Livermore Nacional laboratoriju (dio Sveučilišta u Kaliforniji) razvijen je novi kod, DYNA3D [1], koji predstavlja računalni kod kojim se mogu eksplicitno simulirati dinamički udari pri velikim brzinama pomoću metode konačnih elemenata. Na temelju tog koda kasnije nastaju komercijalni programi za analizu konačnim elementima, MSC.Dytran i LS-DYNA[1].



Slika 1. KRASH model Sikorsky ACAP konceptnog helikoptera [1]

Sikorsky ACAP konceptni helikopter pokušaj je razvoja potpuno kompozitnog helikoptera koji je poslužio za ispitivanje i testiranje kompozitnih materijala i njihovu implementaciju u suvremene helikoptere. Također, numerička analiza Sikorsky ACAP-a izvršena je 1997. godine u MSC.Dytran, programu za dinamičku analizu konačnim elementima, te su numerički rezultati uspoređeni s eksperimentalnim podacima [1], što je prikazano na slici 2.



Slika 2. Eksperimentalna i numerička analiza Sikorsky ACAP [1]

Glavni problemi numeričkih analiza u [6] su bili problemi s modeliranjem podvozja te materijalni model kompozitnog materijala. Sredinom 1990-tih, ukinuti su uvjeti iz MIL-STD-

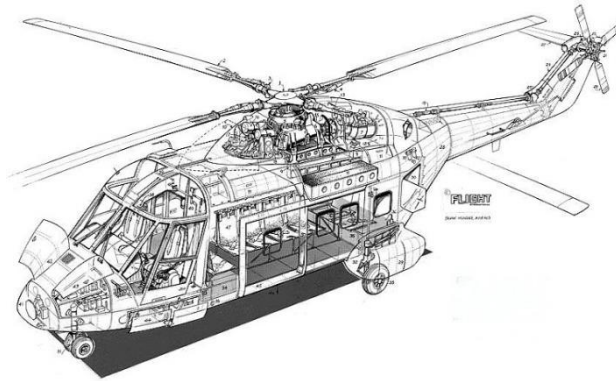
1290A standarda kako bi se konstruktorima omogućilo da na neki drugačiji, inovativniji, način ostvare apsorpiranje energije, bez da se moraju pridržavati određenih kriterija. Daljnjim razvojem računalne tehnike, a time i numeričke analize konstrukcija, omogućila se bolja predvidljivost odziva konstrukcije pri udarnom opterećenju i načini rješavanja istih. Danas u pogledu certifikacija konstrukcija još uvijek nismo došli do krajnjeg cilja, da bi sa 100%-tnom sigurnošću, numeričke rezultate dinamičkih analiza mogli proglasiti točnim. Konvencionalne metalne konstrukcije apsorbiraju energiju udara preko mehanizama plastičnog očvsnuća i popuštanja pojedinih dijelova konstrukcije. Današnje metode analize konačnim elementima omogućavaju poprilično pouzdano simuliranje metalne konstrukcije.

U sljedećem poglavlju biti će objašnjena validacija modela podkonstrukcije helikoptera objašnjenog u ovom radu na temelju ekperimentalnih podataka [1] i podataka numeričke analize [2]. Na temelju dobivenih podataka prokomentirat će se preživljivost posade prema Eiband krivuljama. Eiband krivulje, krivulje tolerancije ljudskog tijela na G opterećenja biti će prikazana u zasebnom četvrtom poglavlju, ali će se tokom rada referirati na iste.

2 Validacija numeričkog modela za aluminijsku konstrukciju poda helikoptera

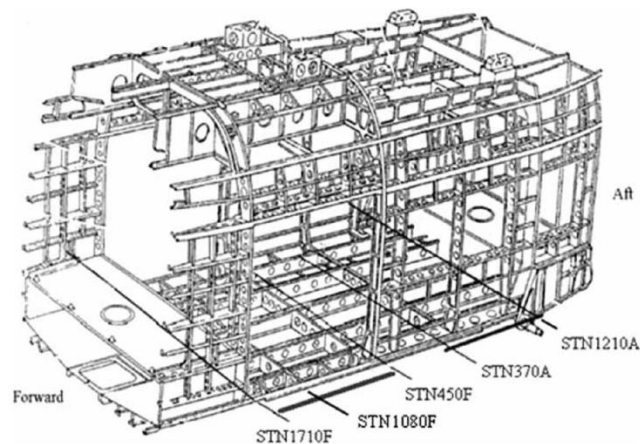
2.1 CAD model

U ovom radu je numerički analiziran dio konstrukcije trupa helikoptera Westland WG30 prikazanog na slici 3. Izrada CAD modela temelji se na dostupnim podacima konstrukcije poda helikoptera koja je eksperimentalno ispitana u [2] i numerički u [3]. U poglavlju 2.3 detaljnije je objašnjen eksperimentalan postav [2] i numerički model iz [3] na temelju kojih se vrši ova validacija. U tim je znanstvenim radovima ispitivana realna sekcija poda helikoptera. Ispitivanje je izvršeno 2007.godine u sklopu EU programa CAST, čiji je cilj bio izrada konstrukcije helikoptera koja bi bila jeftinija, a ujedino i omogućavala efektivniju apsorpciju kinetičke energije pri udaru. Na temelju ovog projekta napisano je nekoliko publikacija.



Slika 3. Westland WG30, Velika Britanija[1]

Iz konstrukcije Westland WG30 helikoptera preuzet je segment konstrukcije trupa na kojem su se vršila eksperimentalna ispitivanja. WG30 helikopter izrađen je početkom 1980-tih, u Velikoj Britaniji. Konstrukcija poda je konvencionalna aluminijska konstrukcija, a materijal od kojeg je rađena je legura aluminija (Al 2024). Konstrukcija promatrane sekcije poda se sastoji od 5 glavnih poprečnih i 3 glavna uzdužnih elemenata, te oplata. Položaj promatrane sekcije poda prikazan je na slici 4 (okviri od STN1710F do STN450F).



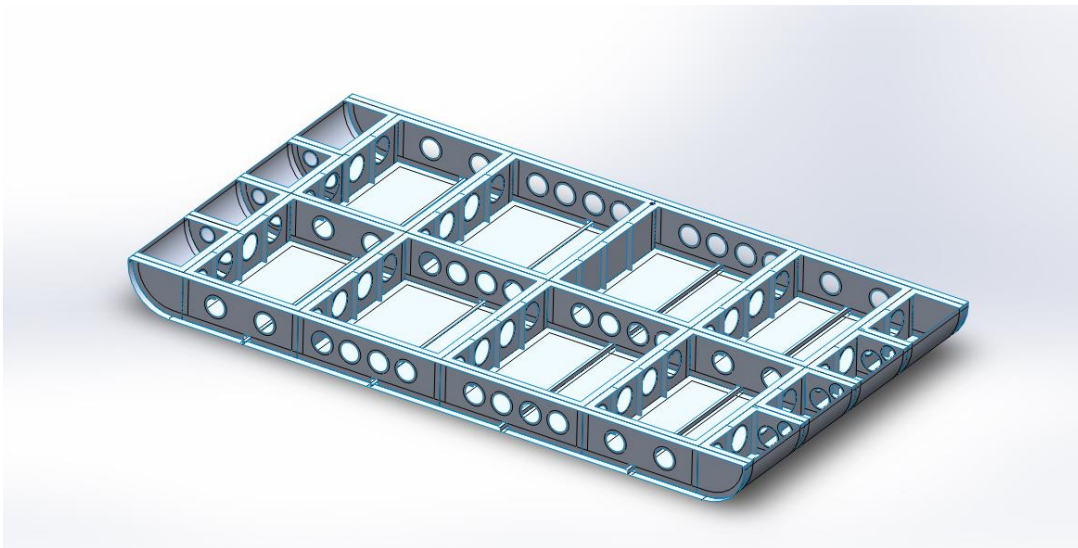
Slika 4. Segment konstrukcije poda između okvira STN1710F i STN450F koja se ispituje u [1] i [2]

Tablica 1 prikazuje dimenzije pojedinih dijelova konstrukcije poda helikoptera WG30 [1] i informacije o korištenim materijalima. Na temelju tablice 1. izađen je model u CAD programu *SolidWorks* koji je prikazan na slici 5. Model je napravljen koristeći površine, odnosno kao dvodimenzionalna geometrija, jer su zrakoplovne konstrukcije izvedene kao tankostijene konstrukcije pa se za diskretizaciju koriste ljuskasti konačni elementi, gdje se debljina ljuske zadaje izravno u programu za analizu konačnim elementima.

Tablica 1 Dijelovi konstrukcije poda helikoptera [1]

Item	Dužina [mm]	Visina [mm]	Debljina [mm]	Broj elemenata	Materijal
V830	1292.0	143.0	1.2	2	Al-2014
V480	630.0	143.0	1.2	4	Al-2014
V0	627.0	143.0	1.2	2	Al-2014
STN450F	1655.0	145.0	1.2	1	Al-2014
STN450F reinforcement	362.0	145.0	0.9	2	Al-2014
STN1710F	2139.0	180.0	0.9	1	Al-2014
z-stringer				9	Al-2014
Web	1300.0	31.0	0.9	-	Al-2014
Lower flange	1300.0	18.5	0.9	-	Al-2014
Upper flange	1300.0	10.5	0.9	-	Al-2014
L-stringers				26	Al-2014
Web	20.0	14.0	0.9	-	Al-2014
Flange	16.0	14.0	0.9	-	Al-2014
Outer skin	1660.0	1272.0	0.7	1	Al-2014
Passenger floor	1249.0	326.0	10.0	2	Fibrelam
	1249.0	456.0	10.0	2	Fibrelam
	1249.0	233.0	10.0	2	Fibrelam

Pri modeliranju uzeta je u obzir većina konstrukcijskih elemenata poda helikoptera. Zanemarili su se nosači na gornjoj plohi poda na koju dolaze ploče koje čine pod helikoptera, te same ploče poda helikoptera, razni električni i ostali elementi koji ne utječu na odziv pri udaru konstrukcije. Ploče poda helikoptera izrađene su od materijala *Fiberlam*, sačasta kompozitna konstrukcija koja se nalazi u većini zrakoplova i helikoptera jer predstavlja izvrstan omjer čvrstoće i vlastite težine. Pod nije modeliran jer nije modeliran ni u [2], ali ga također nije bilo ni u ekperimentalnom ispitivanju. Pod je zamjenjen rubnim uvjetima krutog tijela.

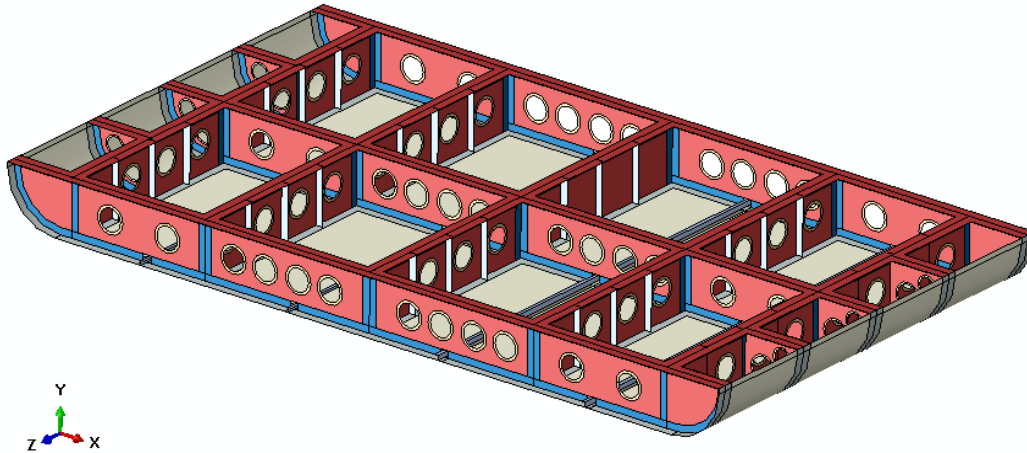


Slika 5. CAD Model izrađen programu *Solidworks*

Dimenzije modela iznose 2.25 x 1.26 x 0.165 metara. Sam model čine i prolazi za razne instalacije, koji ujedino i smanjuju masu konstrukcije. Na modelu se nalaze i vertikalne ukrute, te je posebna pažnja posvećena izradi presjeka geometrije kojima će se kasnije definirati razne debljine konstrukcije. Deblji dijelovi konstrukcije nalaze se na svim spojevima poprečnih i uzdužnih elemenata. Prilikom izrade CAD modela zanemareni su međusobni spojevi sekcija sa zakovicama koji se inače nalaze u većini metalnih zrakoplovnih konstrukcija. Pojednostavljenje je vršeno da bi se u konačnici analiza modela mogla brže izvršiti dok bi se zakovičnim spojevima, konstrukcija zakomplicirala a time i prelazila okvire analize potrebne za ovaj rad.

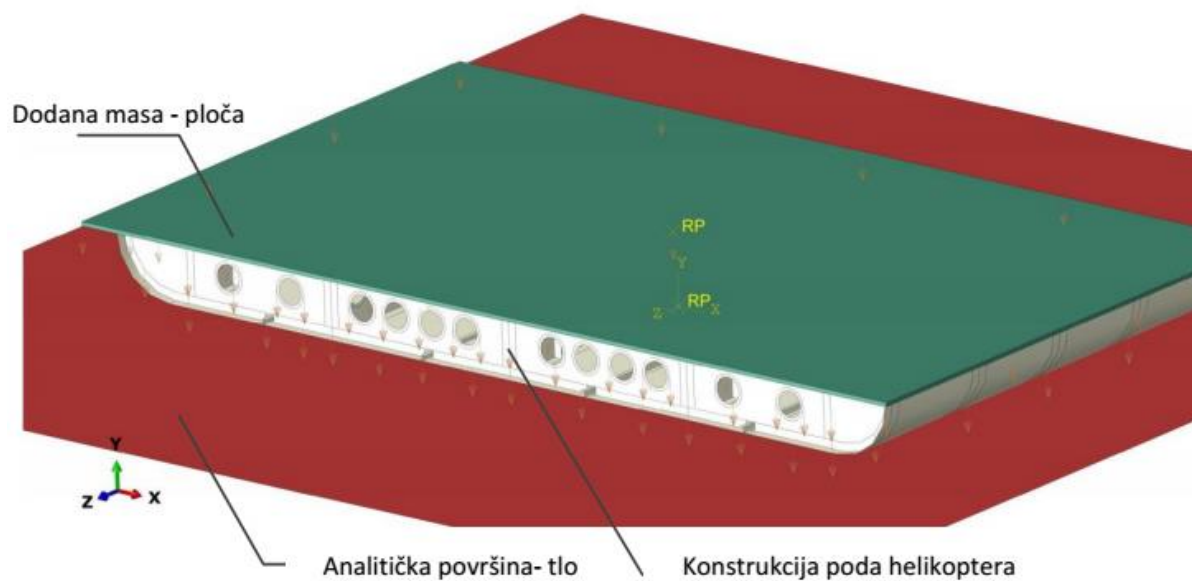
2.2 Numerički model poda helikoptera

Nakon izrade CAD modela, isti je prebačen u Abaqus 6.14, u ACIS formatu. ACIS format sprema trodimenzionalnu geometriju u standardni tekstualni format, koji Abaqus/CAE predprocesor lako čita i pretvara u 3D prikaz.



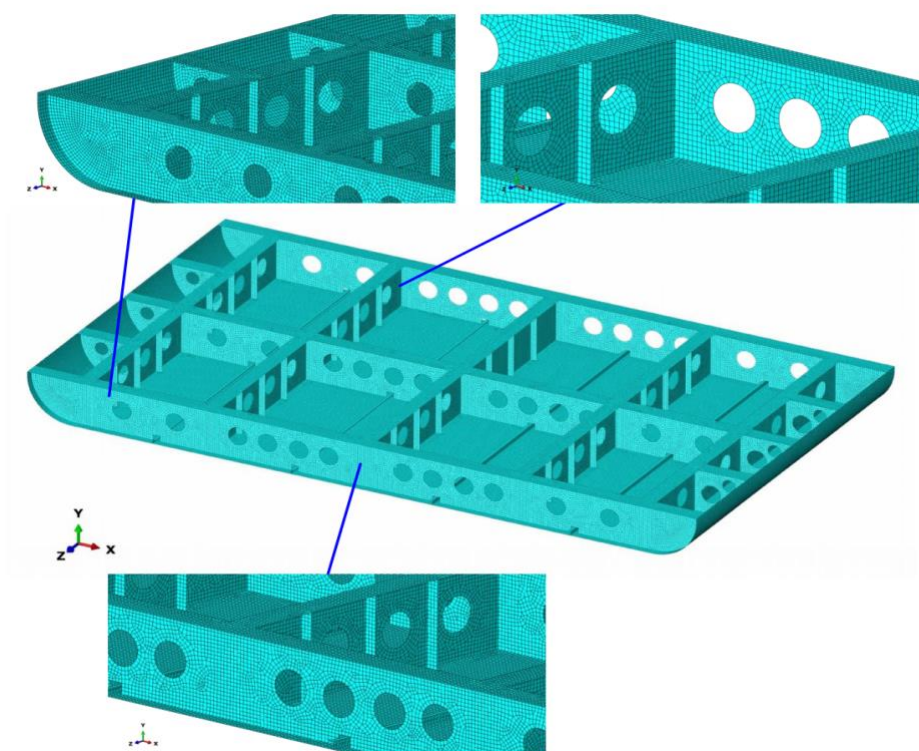
Slika 6. Numerički model poda konstrukcije sa označenim debljinama presjeka [crveno 1.5 mm, sivo 0.7 mm, plavo 1.9 mm, zeleno 2 mm, tamno sivo 2.1 mm]

Na slici 6. vidi se model poda helikoptera gdje različite boje predstavljaju različite presjeke kojima smo dodijelili odgovarajuću debljinu ljuskastih elemenata, prema tablici 1. Debljine ljuskastih elemenata iznose od 0.7 mm za oplatu, do 2.1 mm za spoj okvira i oplate. Kako bi se simulirao jači materijal oko prolaza, presjekom se na tom mjestu definirao deblji materijal s istim svojstvima kao i osnovni. Prolazi su definiran kao osnovni materijal debljine 2 mm. Masa ostatka konstrukcije helikoptera u ekperimentalnom ispitivanju u [2] zamjenjena je dodatnom masom, koja je zajedno s promatranom sekcijom poda puštena da slobodno pada s visine od 3.26 metara kao bi se postigla brzina udara od 8 m/s. eksperimentu [2] u analizu je dodana kruta ploča koja na koju je postavljena dodatna masa, čime se simulira ukupna masa tog dijela helikoptera. Dodatna masa predstavlja dio mase ostatka konstrukcije helikoptera, putnika i sjedala helikoptera, te masu ostalih komponenata koji se tu nalaze. Zemlju predstavlja kruta analitička 2D površina. Masa modelirane aluminijske konstrukcije poda iznosi 19.6 kilograma, a ukupna masa ispitivanog segmenta helikoptera zajedno s dodatnom masom iznosi 1005 kg, prema [2]. Izgled numeričke postavke problema prikazan je na slici 7.



Slika 7. Prikaz rubnih i početnih uvjeta numeričkog modela

Model poda helikoptera diskretiziran je ljuskastim elementima, primarno četverokutnim S4R elementima, te malim brojem trokutnih S3R elemenata na mjestima relativno komplicirane geometrije.



Slika 8. Mreža konačnih elemenata modela konstrukcije poda helikoptera

U tablici 2. prikazani su detalji numeričkog modela koji je usporedbom s eksperimentalnim podacima i provjerom konvergencije rješenja s obzirom na gustoću mreže prihvaćen kao dobra aproksimacija stvarne konstrukcije. Simulacija se vršila na računaru sa dvojezgrenim Intel i5 procesorom od 2,5 GHz i 8 GB radne memorije.

Tablica 2. Podaci o mreži konačnih elemenata

Simulacija	
Broj čvorova	156742
Broj konačnih elemenata	141689
Četverokutnih ljuskastih elemenata S4R	125832
Trokutastih ljuskastih elemenata S3R	1579
Heksaedarskih običnih 3D elemenata C3D8R	14287

2.3 Početni i rubni uvjeti

Simulacija se vrši kao dinamička eksplicitna analiza u programu Abaqus/Explicit, koji upotrebljava eksplicitnu integracijsku shemu za rješavanje visoko nelinearnih sustava s kompleksnim kontaktim problemima. Početni uvjeti simulacije uključuju utjecaj gravitacije, koja iznosi 9.81 m/s^2 . Početna brzina cijelog sustava definirana je prema eksperimentalnom postavu iz [2] te iznosi 8 m/s u vertikalnom smjeru. Analitička površina poda uklještena je preko svoje referente točke. Ploča kojom je simulirana dodatna masa je na konstrukciju poda spojena *tie* vezama, a zajedno sa konstrukcijom pada prema analitičkoj površini koja predstavlja tlo. Inicijalna udaljenost analitičke površine od konstrukcije poda iznosi 5 mm . Ploča na koju smo postavili dodatnu masu, jednoliko raspoređenu po cijeloj površini, modelirana je pomoću običnih, odnosno "solid" trodimenzionalnih C3D8R elemenata. U dodatnim postavkama definirana je kao kruto tijelo, kako bi se izbjegao utjecaj deformiranja ploče na odziv konstrukcije poda. Udarac u pod i međusoban kontakt pojedinih dijelova konstrukcije poda modeliran je kao *General contact*, pri čemu je zanemaren utjecaj trenja.

Kod numeričke simulacije kontakta dodane mase i konstrukcije poda bitnu ulogu ima gustoća mreža konačnih elemenata kontaktnih površina. Ukoliko gustoća mreže dodatne mase nije dovoljno gusta, dolazi do problema sa kontaktnim površinama. Pri tome može doći do grešaka u numeričkoj analizi koje mogu rezultirati pogrešnim odzivom konstrukcije. Kako bi se

izbjegli problemi s modeliranjem kontakta, u ovom slučaju gustoća mreže konstrukcije je približno tri puta veća od gustoće mreže dodatne mase. U numeričkim simulacijama analizirano je realno vrijeme udara u trajanju od 25 ms, što je bilo dovoljno za procjenu oštećenja konstrukcije nakon udara. U numeričkom i eksperimentalnom ispitivanju prema [2] i [3] analizirano vrijeme iznosi 35 ms, ali kako bi se smanjilo vrijeme trajanja simulacija na računalu, podaci do 25 milisekunde daju nam sve potrebne informacije. Produživanjem realnog trajanja simulacije ne predstavlja zanimljive podatke, jer nakon povratnog odziva konstrukcije ne dolazi do novih oštećenja. Trajanje analize od 25 ms realnog vremena, na navedenom računalu iznosi oko 1h i 20 minuta. Povratni odziv konstrukcije događa se oko 12.5 ms analize, što odgovara vrijednostima navedenim u [2] i [3].

2.4 Materijalni model

Materijal korišten za sve dijelove aluminijske konstrukcije poda modeliran je kao elastičan i linearno očvršćujući po dijelovima u plastičnom području. Podaci za Abaqus, uzeti su iz [3], gdje se u sklopu spomenutog CAST projekta vršila eksperimentalna analiza materijala, te se s tim podacima dalje ulazilo u numeričku analizu.

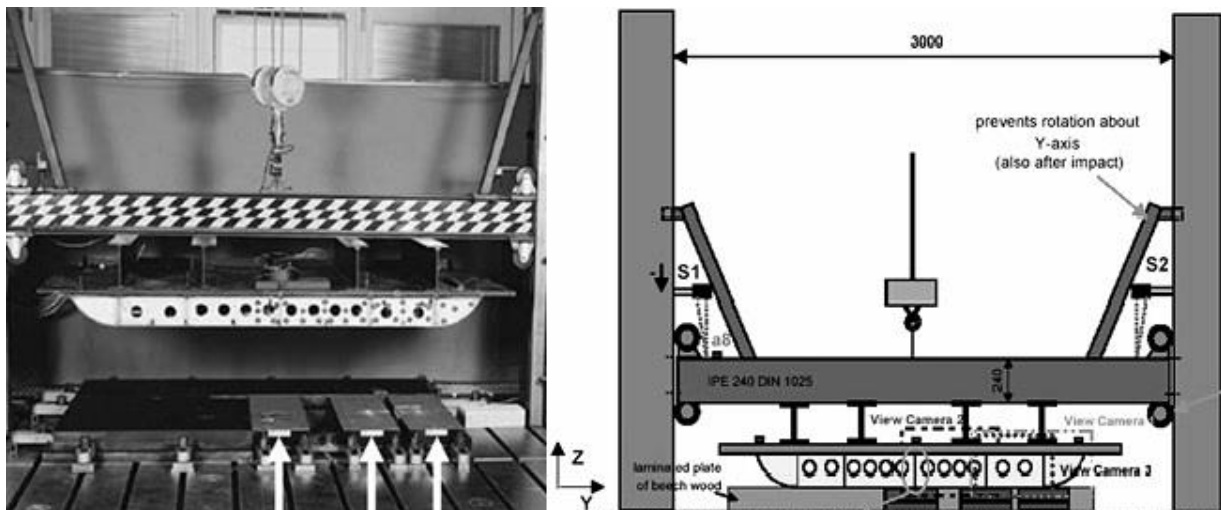
Tablica 3. Podaci za materijal Al-2014 [3]

Efektivno plastično naprezanje [MPa]	Efektivna plastična deformacija [%]
326.8	0.00
336.5	0.49
429.6	2.41
462.5	4.36
495.0	7.31
518.3	10.28
556.6	17.23

Konstitutivnom modelu materijala je dodan i kriterij posmičnog popuštanja *shear failure*, u vidu ekvivalentne plastične deformacije pri 17%. Kriterij posmičnog popuštanja dodan je u .inp (*input*) datoteci. Prema tom kriteriju, kad materijal dostigne plastičnu deformaciju od 17%, element u mreži konačnih elemenata se briše. Ostaje samo njegova masa, dok mehaničkih svojstava više nema te ne utječe na analizu. Za ljuskaste elemente unaprijed je već zadano svojstvo brisanja elemenata [10].

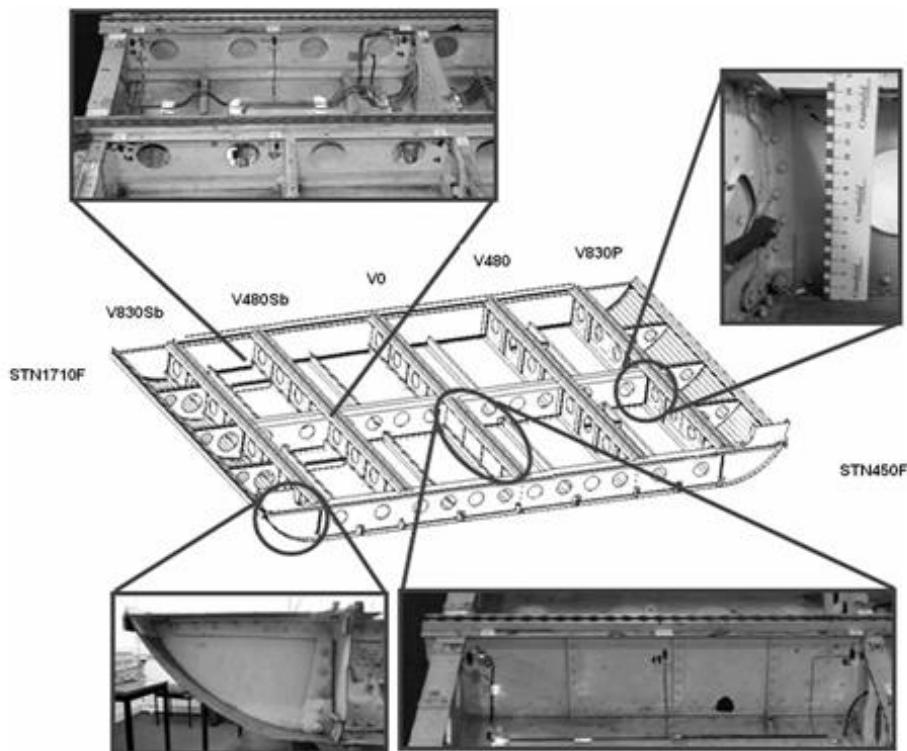
2.5 Eksperimentalna postava ispitivanja prema [2]

Numerička analiza aluminijske konstrukcije poda, kao što je već navedeno, temelji se na eksperimentalnom ispitivanju u sklopu CAST projekta. Test je rađen u tvrtci Eurocopter-Deutschland 2007.godine (tvrtka je preimenovana 2014.godine u Airbus Helicopters). Kao testna platforma korišten je čelična konstrukcija s vodilicama, na koju je kruto postavljena konstrukcija poda helikoptera i dodatna čelična ploča te balasti kako bi se oponašala masa na tom dijelu konstrukcije. Simuliranje brzine od 8 m/s pada, rađeno je spuštanjem konstrukcije slobodnim padom s visine od 3.26 metara. Cilj ispitivanja bio je dobiti podatke o kinematici samog udara mjerenjem akceleracija, brzina i pomaka, te analiza deformacije i način deformiranja konstrukcije.



Slika 9. Prikaz testne platforme za ispitivanje vertikalnog udara konstrukcije [2]

Na slici 9. prikazana je platforma za ispitivanje sa smještajem glavnih laserskih senzora S1 i S2 čije ćemo podatke kasnije uspoređivati sa numeričkim podacima. Ispitivan je prednji dio putničke kabine koji uključuje i nosače vrata. Čelična ploča koja raspodjeljuje jednoliko masu po površini nije nužno realno točno opterećenje, ali radi lakše analize čistog vertikalnog udara pristupilo se toj verziji. Isti pristup proveden je i u [2]. Masa podkonstrukcije iznosi 44 kg, dok ukupna masa cijelog sustava, sa dodatnom masom, podkonstrukcijom, i balastima, iznosi 1005 kg. Balasti služe da bi se cijelu ispitivanu sekciju dovelo do odgovarajuće ukupne mase. Glavni laserski senzori S1, i S2, koji mjere brzinu i dubinu propadanja konstrukcije postavljeni su na testni okvir. Ostali senzori postavljeni su na samu konstrukciju.



Slika 10. Shematski prikaz segmenata konstrukcije poda helikoptera

2.6 Rezultati analize i usporedba sa podacima iz literature

Nakon početnih simulacija koje nisu pokazivale dobar odziv konstrukcije, u definiciju materijala ubačen je “*shear failure*” (kriterij posmičnog popuštanja) gdje je ekvivalentna plastična deformacija od 17%, te se povećala gustoća konačnih elemenata, čime su se dobili bolji rezultati koji su bliži i stvarnim rezultatima iz eksperimenta [2], te numeričkim iz [3].

Odziv početnih simulacija je u usporedbi s podacima navedenim u [2] i [3] bio previše elastičan. Povratni odziv događao se u duplo kraćem vremenu, maksimalan vertikalni progib konstrukcije je bio znatno manji u usporedbi s referentnim vrijednostima. Korištenjem gušće mreže konačnih elemenata, model je počeo pokazivati znatno bolje rezultate. Dodatnim ubacivanjem *shear failure* kriterija u definiciju materijala preko input (.inp) datoteke, numerički model je prikazivao podatke koji su se mogli smatrati dobrom aproksimacijom obzirom na eksperimentalne rezultate.

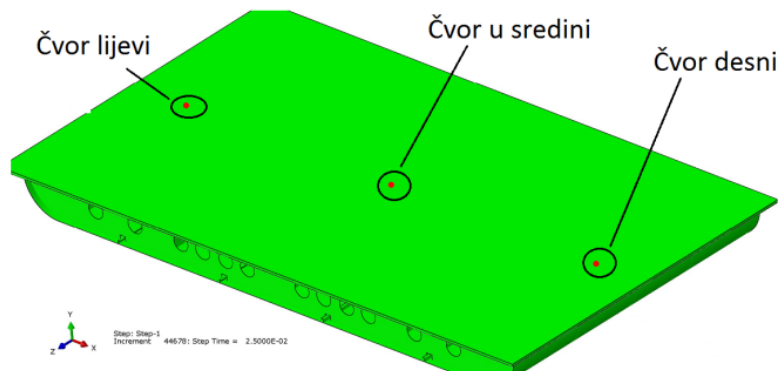
Nakon svih simulacija izdvojena su četiri numerička modela koji najbolje prikazuju proces dobivanja prihvatljivih rezultata analize konačnim elementima. Tablica 4. prikazuje raspored gustoće mreže i broj elemenata numeričkih analiza, te glavna svojstva simulacija.

Tablica 4. Pojediniosti izdvojenih simulacija

	Simulacija 1	Simulacija 2	Simulacija 3	Simulacija 4
Svojstva:	-Bez <i>shear failure</i>	- <i>Shear failure 0.17</i> -Brisanje elemenata	- <i>Shear failure 0.17</i> -Brisanje elemenata	- <i>Shear failure 0.17</i> -Brisanje elemenata
Prosječna veličina konačnog elementa [mm]	15	15	10	7
Broj čvorova	58326	58324	92982	156742
Broj konačnih elemenata:	43528	43528	78056	141689
Broj četverokutnih ljuskastih konačnih elemenata S4R	28279	28279	62630	125823
Broj trokutastih ljuskastih elemenata S3R	962	962	1231	1579
Broj heksaedarskih elemenata C3D8R	14287	14287	14287	14287
Vrijeme simulacije za 25 ms realnog vremena:	~13 min	~14 min	~31 min	~1 h 21 min

Glavni parametri u simulaciji koje smo mjerili su energije u sustavu, te pomak, brzina i ubrzanje koje su u eksperimentalnom dijelu u [2] mjereni pomoću senzora postavljenih na testnu platformu. Čvorovi numeričkog modela čiji su se rezultati koristili za usporedbu s eksperimentalnim vrijednostima odabrani su u skladu s lokacijama senzora u eksperimentalnom postavu prema [2]. Ti se čvorovi nalaze na gornjoj strani krute ploče, a njihov je položaj prikazan na slici 11. Zbog simetrične analize i simetričnog popuštanja materijala uzeo se signal samo sa jednog čvora, čvora u sredini ploče. Na slikama koje u ovom radu prikazuju usporedbu s eksperimentalnim podacima iz [2] prikazani su podaci samo

za senzor S2 jer je kod mjesta na kojem se nalazi senzor S1 došlo do odvajanja okvira STN1710F.

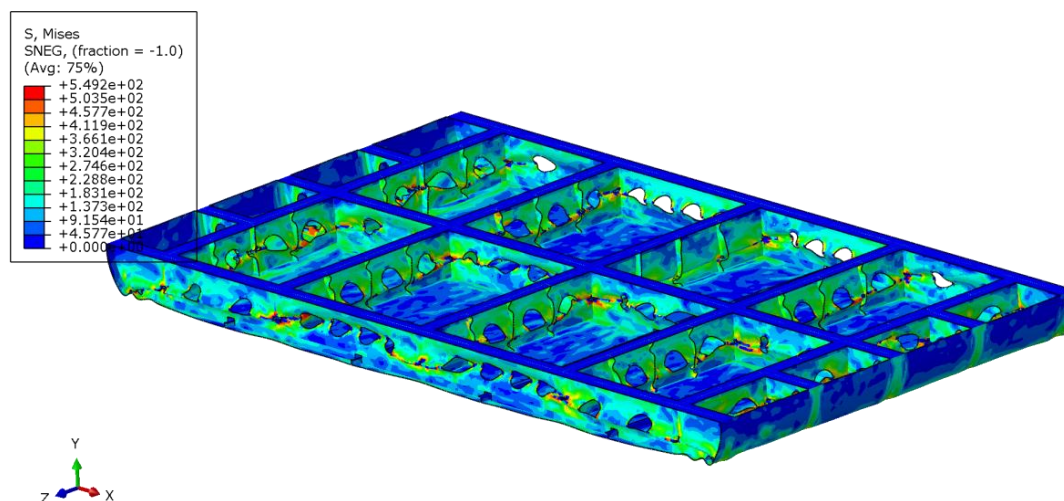


Slika 11. Čvorovi (crveno) na gornjoj ploči na kojima se mjerio pomak, brzina i ubrzanje u analizi

Okvir STN1710F izrađen je od dva aluminijska lima spojenih zakovicama. Spojevi kod okvira STN1710F su popustili te taj dio konstrukcije ima progib veći za 10 %.

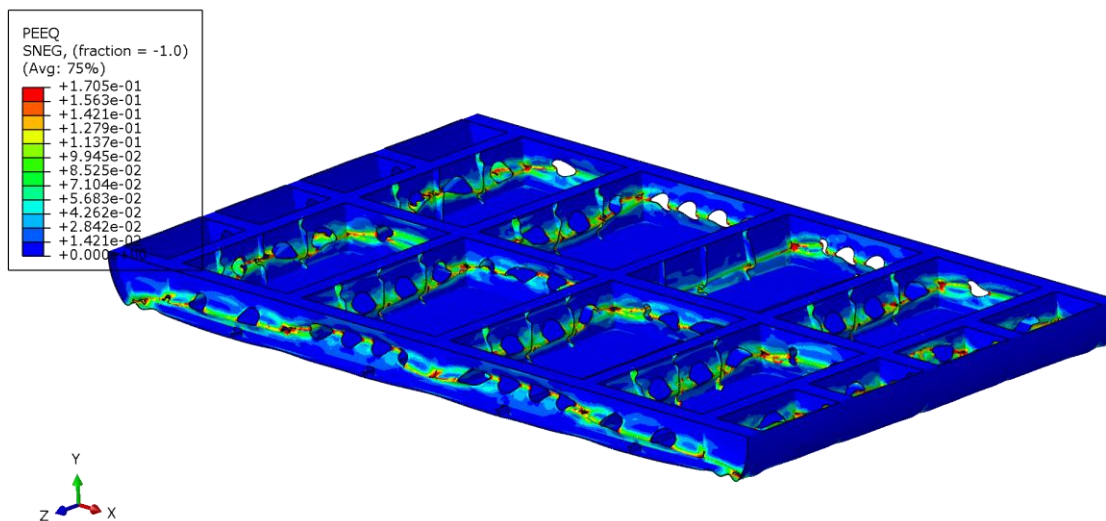
Slike od 12 do 16 prikazuju rezultate analize nakon simulacije 25 ms realnog vremena. Uspoređeni su segmenti i s rezultatima iz eksperimentalnog ispitivanja [2].

Na slikama 12 i 13 primjećuje se stvaranje zone plastične deformacije nakon koje konstrukcija više ne apsorbira udar na efektivan način. Zone visokih vrijednosti ekvivalentnih Von Mises napreznja i plastičnih deformacija pokazuju sličan obrazac kao i zone plastifikacije na realnoj konstrukciji [2].

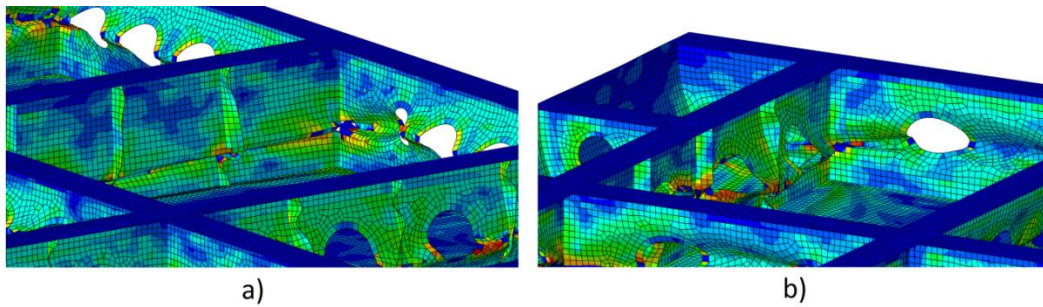


Slika 12. Ekvivalentna Von Mises naprezanja na kraju simulacije (25 ms realnog vremena), [MPa]

Slika 13, pokazuje način deformiranja, odnosno stvaranje zone plastifikacije nakon koje konstrukcija gubi daljnju mogućnost dobre apsorpcije energije.

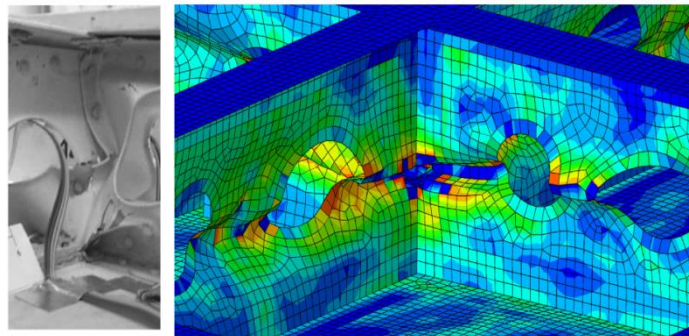


Slika 13. Ekvivalentna plastična deformacija na kraju simulacije (25 ms realnog vremena)



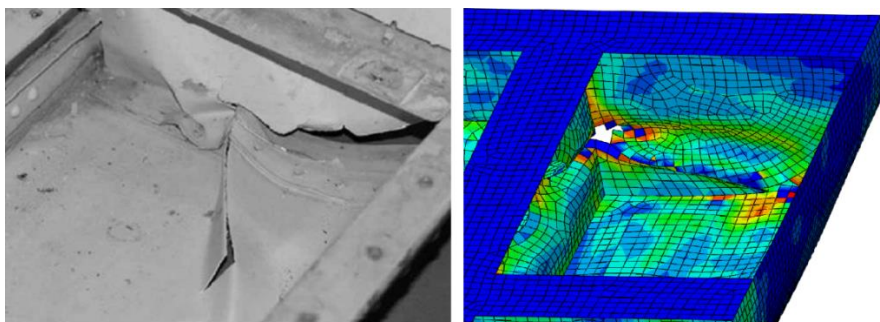
Slika 14. Detalji deformacije modela. a) sredina konstrukcije, spoj okvira V0 i STN1080F, b) prikaz ruba konstrukcije (okvir STN1710F).[Ekvivalentna Von Mises napreznja]

Slika 15. pokazuje usporedbu spoja dva segmenta konstrukcije, te način deformiranja. Općenito je način izvedbe spoja vrlo krut s pogleda apsorpcije udara.



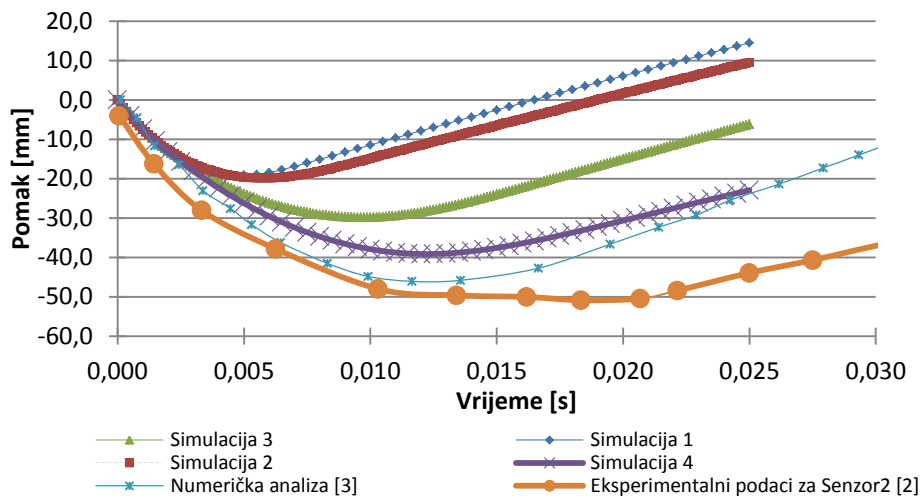
Slika 15. Usporedba ponašanja spoja okvira poda helikoptera u eksperimentalnoj [2] i numeričkoj analizi [Ekvivalentna Von Mises napreznja]

Na zakrivljenom rubnom dijelu konstrukcije dolazi do pucanja materijala (slika 16) s tim da postoji određena razlika obzirom na samo mjesto pucanja u odnosu na realnu konstrukciju. Ali primjetno je da su plastične deformacije vrlo visoke u istim segmentima okvira.



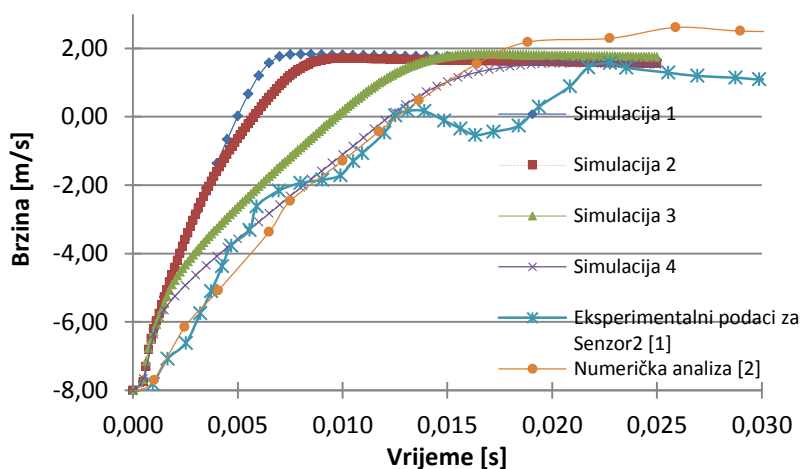
Slika 16. Ponašanje rubnog zakrivljenog dijela okvira STN1710F, eksperimentalno [2] i numerički

Slike 17 do 22 prikazuju usporedbu mjerenih podataka za provedene simulacije i njihovu usporedbu sa odzivom realne konstrukcije [2], te odzivom konstrukcije u numeričkoj analizi [3].



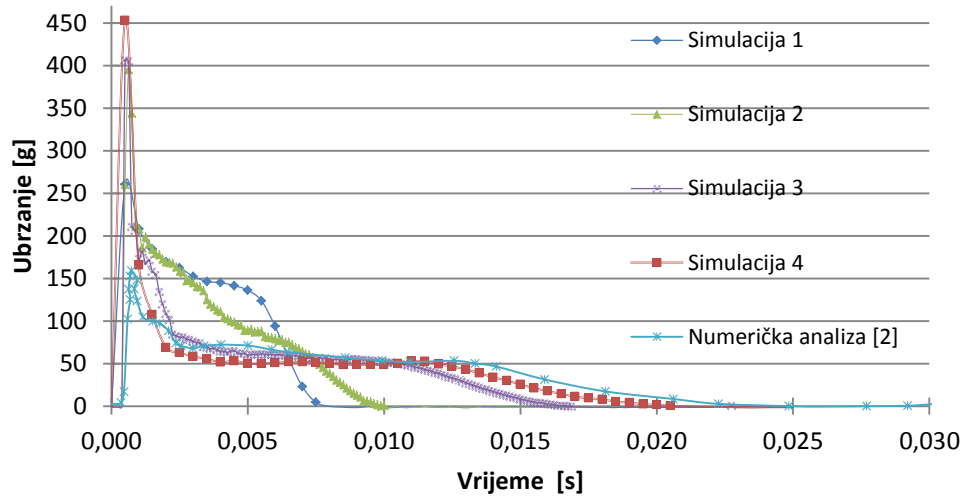
Slika 17. Pomaci točke mjereni na krutoj ploči

Pomaci točke diskretiziranjem gušće mreže modela, približavaju se eksperimentalnim i numeričkim podacima iz [2] i [3], što je prikazano na slici 17. Vidimo također da se vrijeme u kojem se događa povratni odziv te samo propadanje konstrukcije u vertikalnom smjeru, približno poklapa s numeričkim podacima [2], dok za eksperimentalne podatke, možemo prihvatiti dobivenu razliku zbog uvođenja pojednostavljenja modela nabrojanih u prethodnim poglavljima. Simulaciju 4 smo uzeli kao jako dobru aproksimaciju ponašanja stvarnog modela.



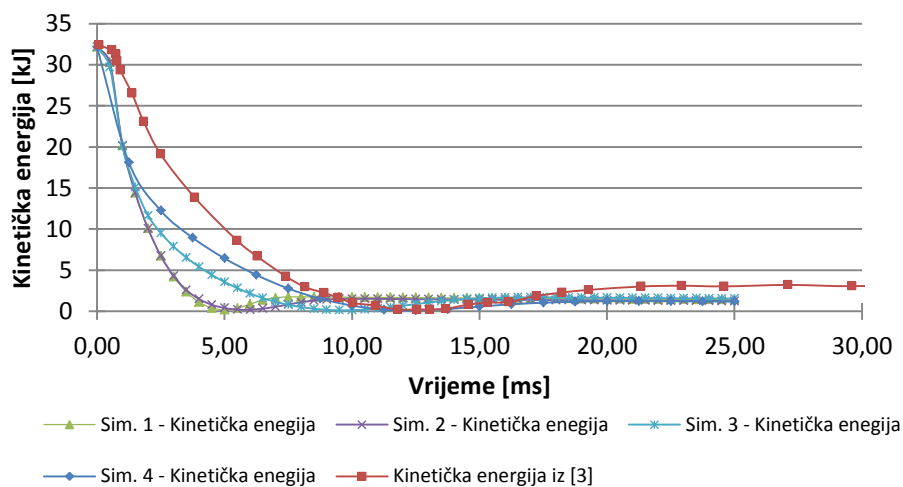
Slika 18. Brzine mjerene na krutoj ploči

Brzina kojom se konstrukcija odbija od zemlje, u prosjeku iznosi oko 1.5 m/s, s tendencijom smanjivanja brzine zbog uvedene gravitacije u numeričkom modelu, što je prikazano na slici 18.



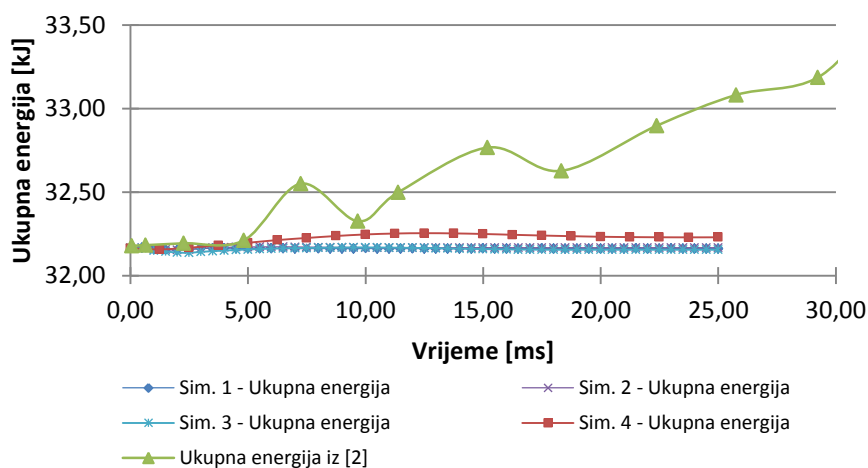
Slika 19. Ubrzanja mjerena na krutoj ploči

Slika 19 prikazuje ubrzanja mjerena na krutoj ploči, te usporedbu dobivenih rezultata s podacima iz [2]. Kod mjerenja ubrzanja, javlja se veliki skok unutar jako kratkog vremena. Obzirom na Eiband krivulje, koje su detaljnije objašnjene u poglavlju 4, kratkotrajni impuls velikog opterećenja ne utječe ozbiljno na ljudski organizam. S druge strane, primjetno je dugotrajnije opterećenje od približno 50 g, koje svojim trajanjem i iznosom ulazi u područje ozbiljnih ozljeda za ljudsko tijelo (poglavlje 4). Dobiveni rezultat se jako dobro podudara s rezultatima referentne numeričke analize.

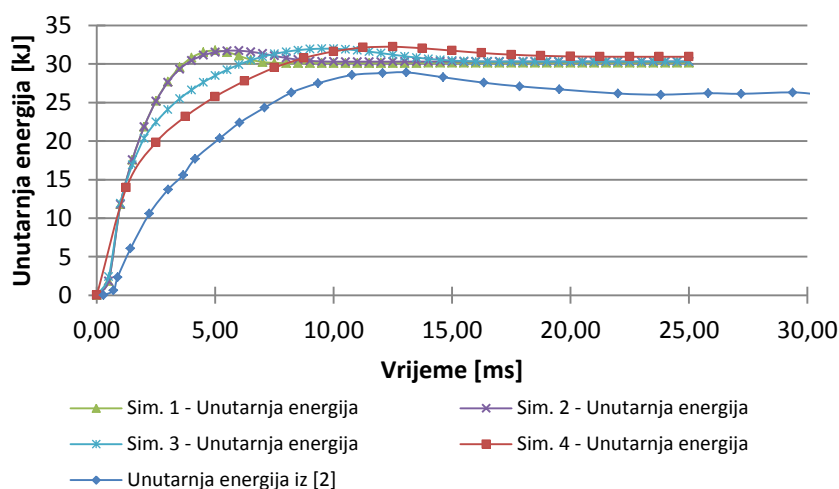


Slika 20. Promjena kinetičke energije numeričkog modela i usporedba s vrijednostima iz [3]

Slika 20 prikazuje promjenu kinetičke energije numeričkog modela i usporedbu s vrijednostima navedenim u [3]. Promjena kinetičke energije u skladu je sa očekivanim promjenama. U grublje diskretiziranim modelima primjetan je oštriji pad kinetičke energije, i vrlo kratko vrijeme potrebno do povratnog odziva konstrukcije, što pripisujemo problemima s nedovoljno gustom mrežom konačnih elemenata. Ukupna energija sustava u simulacijama ne raste (slika 21, dok je u numeričkoj analizi iz [3], primjetan lagan porast ukupne energije koja se može pripisati djelovanju iz formulacije ljuskastih konačnih elemenata kad dolazi do velike deformacije elementa. Taj porast se može zanemariti jer ne utječe znatno na rezultate analize.



Slika 21. Promjena ukupne energije numeričkog modela i usporedba sa [3]

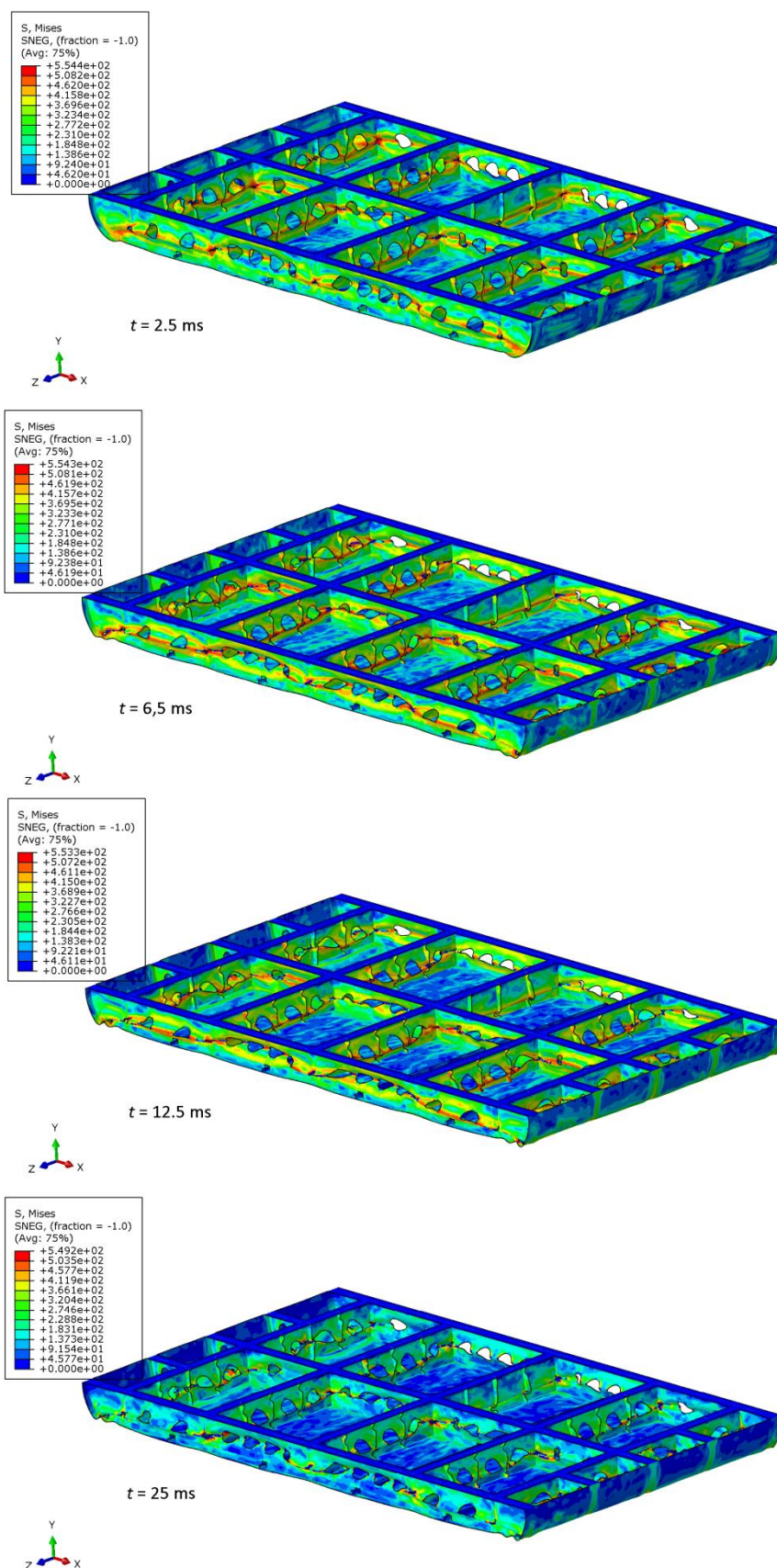


Slika 22. Promjena unutarnje energije numeričkog modela i usporedba sa [2]

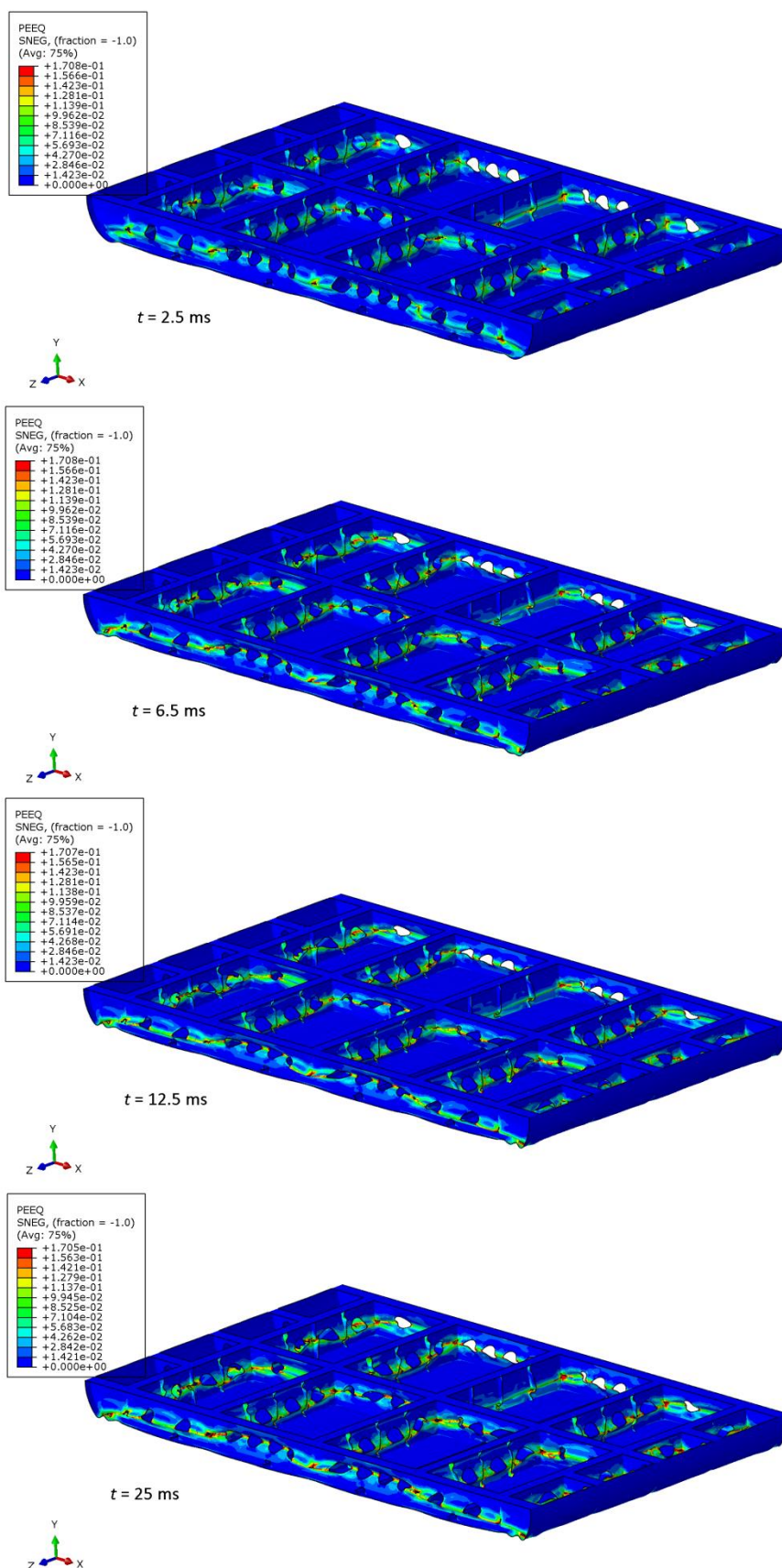
U odnosu na numeričku analizu [3], primjetna je viša razina unutarnje energije, što znači da se u simulacijama veći dio početne konačne energije pretvorio u unutrašnju energiju sustava.

Kao što je već navedeno, numerički model aluminijske konstrukcije pod helikoptera pokazuje jako dobre rezultate u usporedbi sa eksperimentalnim rezultatima, te možemo reći da ovaj materijalni model dobro opisuje stvarnu deformaciju konstrukcija. Dodatno refiniranje podataka i modela, moglo se postići uvođenjem zakovičnih spojeva u konstrukciji. To je rađeno u [2] vjerojatno zato da bi se dobio realniji odziv konstrukcije jer zakovični spoj rezultira lokalizacijom naprezanja pa će se na tim mjestima prije pojaviti popuštanje konstrukcije, ali to dodatno komplicira numerički model i prelazi okvire diplomskog rada. Sve to bi u konačnici rezultiralo povećanim računalnim zahtjevima, što u ovom slučaju validacije nije potrebno s obzirom na dobivene rezultate.

Na slikama 23 i 24 prikazane su raspodjele ekvivalentnog Von Mises naprezanja, te ekvivalentnih plastičnih deformacija u određenim realnim vremenskim trenucima analize. Na obje slike primjećujemo stvaranje linije plastifikacije na najslabijim dijelovima konstrukcije.

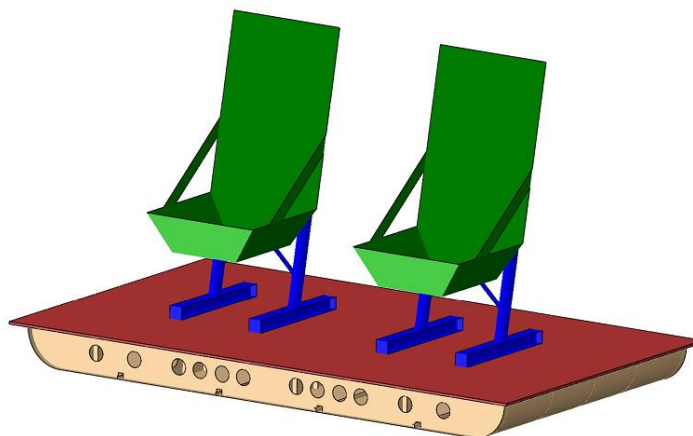


Slika 23. Raspodjela ekvivalentnog Von Mises naprezanja aluminijskog modela [MPa]



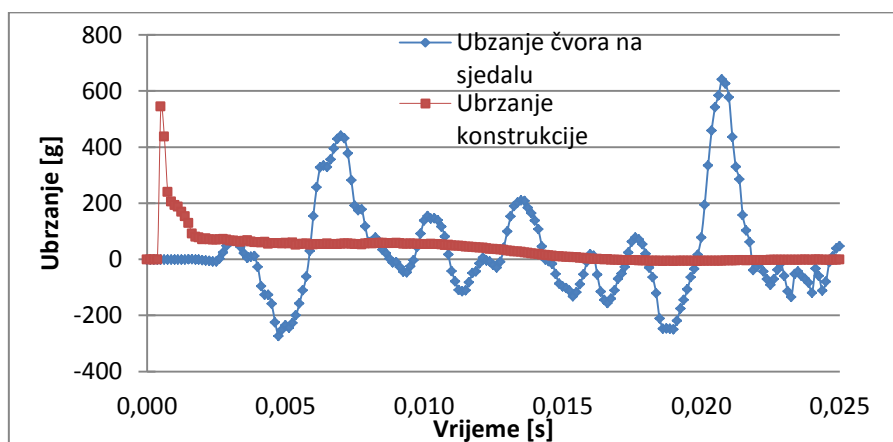
Slika 24. Raspodjela ekvivalentnih plastičnih deformacija u aluminijском modelu [mm/mm]

Nakon validacije aluminijskog modela koji je pokazao vrlo dobre rezultate u dodatnim preliminarnim analizama pokušala su se modelirati i sjedala za pilota/posadu (slika 25), ali bez kompleksnijeg definiranja spojeva same stolice i njezine mogućnosti za apsorpiranje energije udara.



Slika 25. Implementacija modela sjedala u aluminijski model konstrukcije poda helikoptera

Slika 26 pokazuje usporedbu dobivenih rezultata za ubrzanje na čvoru na sjedalu te čvoru na krutoj ploči na konstrukciji. Podaci o dobivenim ubrzanjima i pomacima na sjedalima u tim analizama nisu imali previše uporišta za daljnje razmatranje. Bez prigušnih elemenata, ubrzanja mjerena na sjedalu pokazivala su čudan obrazac ponašanja i prevelike iznose. Numerička analiza, konstrukcije sa sjedalima bi trebala uzeti u obzir kompleksne mehanizme elastičnih i prigušnih elemenata na stolicima, te bi time prelazila okvire ovog diplomskog rada. Iako preživljivost posade uvelike ovisi i o sjedalu te mogućnosti sjedala na apsorpira udare, u radu se primarno obraćala pozornost samo na odziv konstrukcije poda.



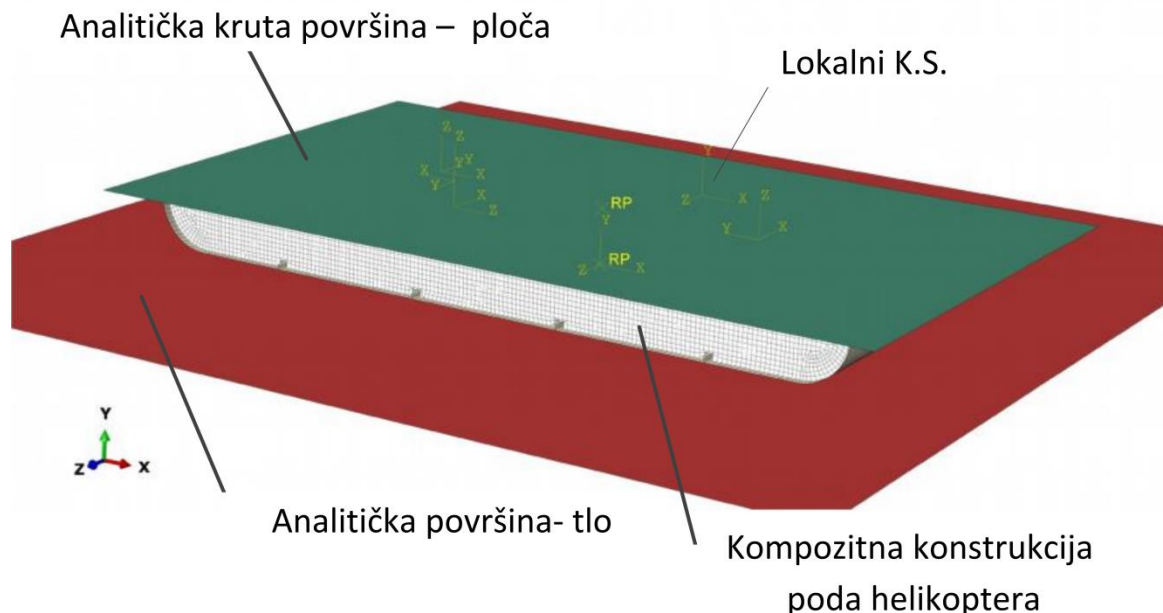
Slika 26. Podaci o ubrzanjima u preliminarnim analizama konstrukcije sa sjedalima

3 Kompozitna konstrukcija i numerička analiza

3.1 Numerički kompozitni model konstrukcije

Kompozitni model konstrukcije temelji se na geometriji aluminijskog modela. U skladu s tim, dimenzije kompozitne konstrukcije su identične dimenzijama aluminijskog modela, uz pojednostavljena geometrije koja su rezultat uzimanja u obzir tehnologija proizvodnje kompozitnih konstrukcija. Kompozitni model nema prolaze (otvore) kroz konstrukciju jer bi dodatnim prolazima narušili čvrstoću konstrukcije te opet, posljedično, zakomplicirao bi se model. Model se sastoji od oplata, glavnih poprečnih i uzdužnih elemenata, kojima su definirani presjeci koji omogućavaju modeliranje debljeg sloja kompozita na mjestu spojeva, odnosno tanjeg na mjestima manjeg opterećenja. Postava kompozitnog modela prikazana je na slici 27.

Za modeliranje kompozitne konstrukcije korišteni su ljuskasti konačni elementi S4R, isto kao i kod aluminijske konstrukcije poda. Zbog problema sa kontaktom u preliminarnim analizama, dodatna ploča, koja je u analizi s aluminijskom konstrukcijom bila modelirana pomoću 3D konačnih elemenata, zamijenjena je analitičkom krutom površinom.

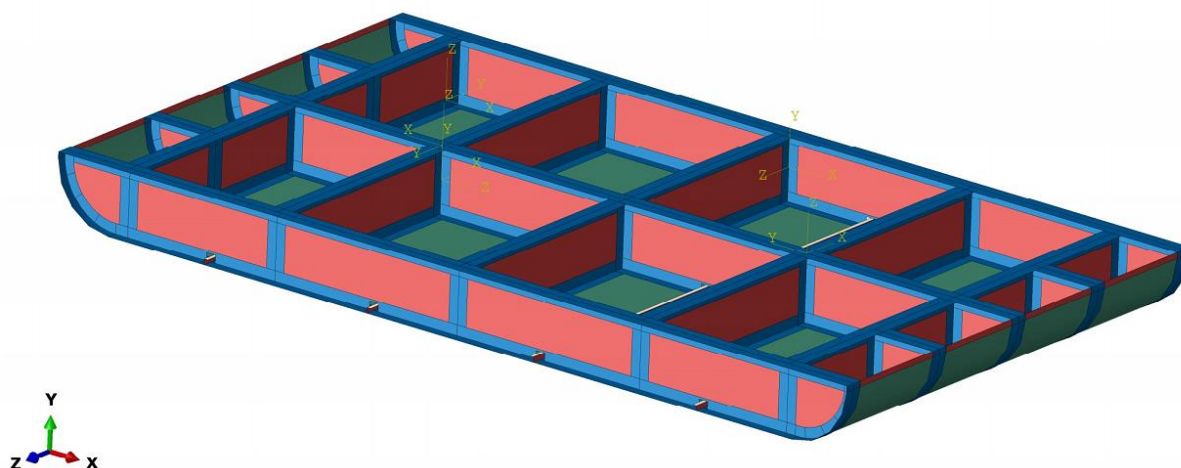


Slika 27. Postava numeričke simulacije sa kompozitnom konstrukcijom

U preliminarnim analizama, mreža kompozitne konstrukcije pri deformiranju ulazila je u mrežu ploče dodatne mase, čime je dolazilo do nefizikalnih obrazaca ponašanja gornje površine konstrukcije. Zbog problema s kontaktom, ukupna energija u simulaciji u nekom

trenutku skokovito poprima i deseterostruko veće vrijednosti, uz kompleksni obrazac deformiranja kompozitnog materijala, dolazi do znatnog usporavanja analize te takvi rezultati više nisu mjerodavni. Zamjenom mreže 3D elemenata analitičkom krutom površinom izbjegli smo probleme s kontaktom između dvije površine različitih vrsta i veličina konačnih elemenata, te su se postigli bolji rezultati analiza.

Prilikom numeričkog modeliranja kompozitnih konstrukcija potrebno je obratiti definirati koordinatne sustave u odnosu na koje se mjere postavni kutovi pojedinih slojeva u višeslojnim kompozitnim konstrukcijama. Sukladno tome, u modelu je definirano je nekoliko lokalnih koordinatnih sustava u odnosu na koje se mjere postavni kutovi slojeva pojedinih dijelova konstrukcije. Lokalne osi su modelirane za uzdužne vertikalne elemente, poprečne vertikalne elemente, te za oplatu i horizontalne elemente, s pripadajućim smjerovima normala. Unificirane su i definirane normale geometrije elemenata konstrukcije, jer se u odnosu na normalu ljuskastih konačnih elemenata definira redoslijed slojeva u višeslojnom kompozitu.



Slika 28. Prikaz modela kompozitne konstrukcije sa definiranim lokalnim koordinatnim sustavima i sekcijama različitog presjeka [Zeleno 5 slojeva, crveno 20 slojeva, plavo 22 sloja ugljičnim vlaknima ojačane epoksidne smole]

Na slici 28 prikazan je kompozitni model konstrukcije, gdje različite boje označavaju različite sekcije kojima se zasebno definira lokalna orijentacija materijala te debljina, odnosno broj slojeva kompozitnog materijala. Odabir slojeva vršio se na taj način da kompozitna konstrukcija bude najmanje 10% lakša od istovjetne aluminijske konstrukcije. Masa aluminijske konstrukcije pada iznosi 19.6 kg, dok je masa kompozitne konstrukcije modelirane i analizirane u radu 17.4 kg, što znači da je kompozitna konstrukcija 11% lakša do

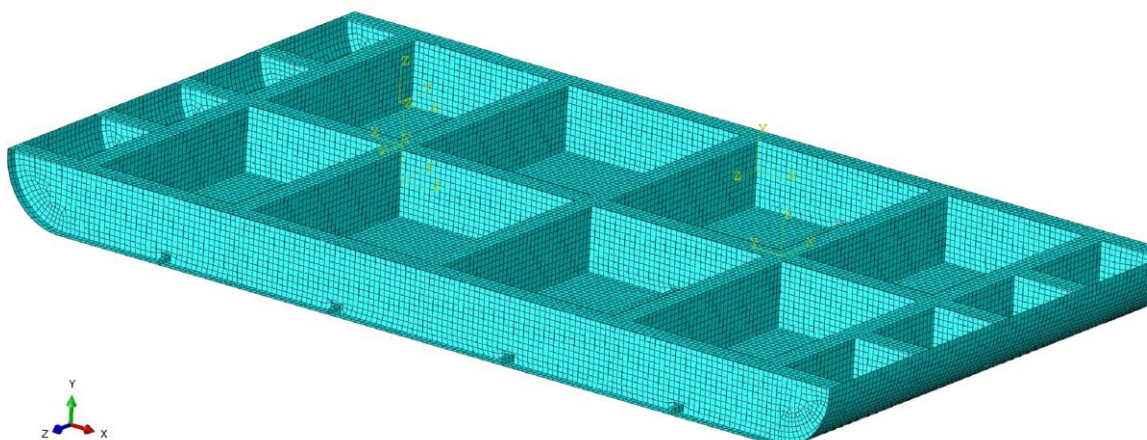
aluminijske. Cilj implementacije kompozitnog materijala u realnim konstrukcijama primarno je ušteda na masi. Oplata je definirana kao kompozitni materijal s 5 slojeva ugljičnim vlaknima ojačanom epoksidnom smolom, jedinične debljine sloja 0.125 mm. Čime je ukupna debljina oplate iznosila 0.625 mm. Elementi ukrute oplate, z-uzdužnice, modelirane su sa 12 slojeva materijala, ukupne debljine 1.5 mm. Vertikalni uzdužni i poprečni elementi definirani su kao kompozit sa 20 slojeva, ukupna debljina kompozita 2.5 mm, dok su ojačani dijelovi definirani kao materijal sa 22 sloja jednosmjerne ugljičnim vlaknima ojačane epoksidne smole, s ukupnom debljinom kompozita 2.75 mm (slika 28).

U tablici 5. nalaze se podaci za odabranu simulaciju kompozitne konstrukcije. Nakon provedenih preliminarnih analiza i odrađenih izmjena u modelu dobiven je relativno stabilni numerički model kompozitne konstrukcije.

Tablica 5. Mreža konačnih elemenata kompozitnog modela

Vrsta elementa	Broj elementa
Ljuskasti četvrtasti elementi S4R	32732
Ljuskasti trokutasti elementi SR3	59
Ukupni broj konačnih elemenata	32791
Veličina konačnog elementa	14 mm

Veličina konačnog elementa mreže iznosi 13 mm, a vrijeme realnog trajanja analize je 25 ms. Na računalu, vrijeme obrade analize iznosi oko 16 sati za ovaj model.



Slika 29. Mreža konačnih elemenata kompozitnog modela

3.2 Materijalni model

Za materijal kompozita, korištena je ugljičnim vlaknima ojačana epoksidna smola. Raspored i orijentacija glavnih slojeva određena je prema [7], pri čemu se raspored slojeva definirao kao simetrični raspored sa orijentacijom slojeva pod različitim kutovima (tablica 6). Materijalni model kompozitnih slojeva opisan je ortotropnim materijalom u ravninskom stanju naprezanja. I njegova su svojstva definirana u glavnom materijalnom koordinatnom sustavu svakog sloja.

Tablica 6. Tablica rasporeda i broja slojeva materijala

Sekcija	Broj slojeva	Raspored slojeva
Oplata	5	[45,90,0,90,45]
Vertikalni uzdužni i poprečni elementi	20	[45,0,90,-45,90,0,90,45, 45,90] _s
Ojačani vertikalni i uzdužni elementi	22	[45,90,0,-45,90,-45,0,45-45,0,90] _s

Rasporedi slojeva definirani su kao simetrični s početnim i zadnjim slojem pod 45° u odnosu na lokalnu materijalnu os x .

Tablica 7. Mehanička svojstva ugljičnim vlaknima ojačane epoksidne smole [8]

E_1 [GPa]	E_2 [GPa]	G_{12} [GPa]	ν_{12}	ρ [kg/m ³]
162.00	8.34	4.79	0.339	1543

Mehanička svojstva i parametri čvrstoće korišteni u simulaciji, čijim se podacima modelirao materijalni model kompozitnog materijala, prikazani su u tablicama 7. i 8. Mehanička svojstva i parametri čvrstoće odgovaraju CFRP kompozitu IM7/8551-7 [7], pri čemu je CFRP *carbon fiber-reinforced polymer*, odnosno ugljičnim vlaknima ojačani polimer.

Tablica 8. Parametri čvrstoće ugljičnim vlaknima ojačane epoksidne smole [7]

Čvrstoća	X^T [MPa]	X^C [MPa]	Y^T [MPa]	Y^C [MPa]	S [MPa]
Vrijednost	1500	1500	40	246	68

3.3 Hashinov kriterij popuštanja

Kompozitni materijali u odnosu na izotropne (tehničke) materijale imaju potpuno različite mehanizme popuštanja, i ne mogu se opisati klasičnim postupkom kao krhki ili duktilni lom. Sam mehanizam popuštanja je poprilično složeniji, što proizlazi iz građe kompozitnih materijala [9].

Spajanje većeg broja kompozitnih slojeva (često i do nekoliko stotina), različito orijentiranih, od kojih svaki sloj ima najmanje dvije komponente, uzrokuje različite načine popuštanja. Prema [9] kriteriji popuštanja koji se najčešće razmatraju su:

- Lom matrice
- Pucanje vlakna
- Izvlačenje vlakna
- Delaminacija, odnosno odvajanje slojeva kompozita

Kriteriji popuštanja uvijek se postavljaju za jedan sloj, a naprezanja su definirana u glavnom materijalnom sustavu te je nužno poznavati pet parametara čvrstoće ili pet parametara deformacija. Glavna os 1 materijalnog sustava usmjerena je u smjeru vlakana, os 2 je u ravnini, a os 3 okomito na sloj kompozitnog materijala.

Većina kompozitnih materijala, nakon konačnog linearnog elastičnog istezanja puca bez značajne plastične deformacije. Abaqus nudi mogućnost modeliranja takvog popuštanja materijala, gdje se oštećenje određuje prema Hashin-ovom kriteriju popuštanja.

Naprezanje u ortotropnom materijalu uz pretpostavku ravninskog stanja naprezanja određeno je konstitutivnom relacijom

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C}_d \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (1)$$

gdje je \mathbf{C}_d označena matrica elastičnosti elemenata koja uključuje i stanje oštećenosti. Ta matrica ima oblik

$$\mathbf{C}_d = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} (1-d_f)E_f & (1-d_f)(1-d_m)v_{21}E_1 & 0 \\ (1-d_f)(1-d_m)v_{12}E_1 & (1-d_m)E_2 & 0 \\ 0 & 0 & (1-d_s)G_{12}D \end{bmatrix}. \quad (2)$$

U jednadžbi (2), d_f predstavlja parametar oštećenja vlakana, d_m je parametar oštećenja matrice, a d_s parametar posmičnog oštećenja, E_l Youngov modul u smjeru vlakana, E_2 Youngov modul sloja u smjeru okomitom na smjer vlakana, G_{12} modul smicanja, a ν_{12} i ν_{21} Poissonovi koeficijenti. Sva svojstva materijala odnose se na glavni materijalni koordinatni sustav jednog sloja kompozita.

Parametar D definira se kao

$$D = 1 - (1 - d_f) (1 - d_m) \nu_{12} \nu_{21} . \quad (3)$$

Prema [10] Hashinov kriterij popuštanja u Abaqus-u pokriva četiri načina popuštanja:

- Pucanje vlakana pod vlačnim opterećenjem,
- Izvijanje vlakana pod tlačnim opterećenjem,
- Lom matrice pod poprečno vlačnim opterećenjem,
- Lom matrice pod poprečno tlačnim opterećenjem.

Hashinov kriterij popuštanja definiran je preko parametara čvrstoće sloja, pa je potrebno poznavati slijedeće parametre čvrstoće:

- X^T – vlačna čvrstoća u smjeru vlakana,
- X^C – tlačna čvrstoća u smjeru vlakana,
- Y^T – vlačna čvrstoća u smjeru okomitom na smjer vlakana,
- Y^C – tlačna čvrstoća u smjeru okomitom na smjer vlakana,
- S^L – uzdužna smična čvrstoća,
- S^T – poprečna smična čvrstoća.

Materijal popušta kada je jedan od indeksa kriterija popuštanja veći od 1 te prema [10] matematička formulacija kriterija popuštanja za različite načine popuštanja ima oblik:

- Vlačno opterećenje vlakana

$$F_f^t = \left(\frac{\hat{\sigma}_{11}}{X^T} \right)^2 + \alpha \left(\frac{\hat{\tau}_{12}}{S^L} \right)^2, \quad (4)$$

- Tlačno opterećenje vlakana

$$F_f^c = \left(\frac{\hat{\sigma}_{11}}{X^C} \right)^2, \quad (5)$$

- Vlačno opterećenje matrice

$$F_m^t = \left(\frac{\hat{\sigma}_{22}}{Y^T} \right)^2 + \left(\frac{\hat{\tau}_{12}}{S^L} \right)^2, \quad (6)$$

- Tlačno opterećenje matrice

$$F_m^c = \left(\frac{\hat{\sigma}_{22}}{2S^T} \right)^2 + \left[\left(\frac{Y^C}{2S^T} \right) - 1 \right] \frac{\hat{\sigma}_{22}}{Y^C} + \left(\frac{\hat{\tau}_{12}}{S^L} \right)^2. \quad (7)$$

Vrijednost naprežanja $\hat{\sigma}_{ij}$ u jednadžbama od (4) do (7) odnose na članove efektivnog tenzora naprežanja, kojima je definirano stanje naprežanja u oštećenom materijalu. Osim parametara čvrstoće, u ovim se jednadžbama javlja i koeficijent α , kojim je određen doprinos posmičnih naprežanja u nastajanju oštećenja vlakna pri vlačnom opterećenju. Parametri čvrstoće za vlaknima ojačanu epoksidnu smolu, koji su korišteni u ovom radu, prikazani su u tablici 8.

Efektivni tenzor naprežanja definiran je preko operatora oštećenja \mathbf{M} prema jednadžbama (8) i (9).

$$\hat{\boldsymbol{\sigma}} = \mathbf{M}\boldsymbol{\sigma} \quad (8)$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \frac{1}{(1-d_f)} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{(1-d_m)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{(1-d_s)} \end{bmatrix} \quad (9)$$

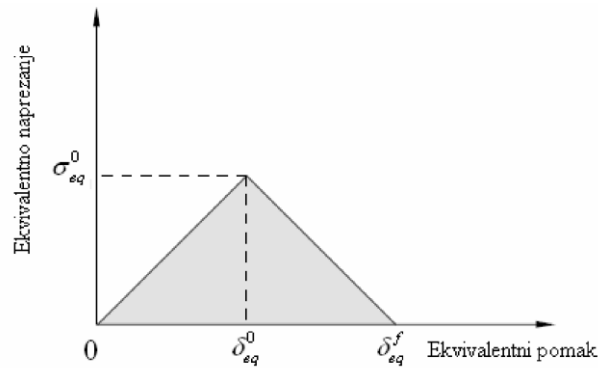
Iznosi parametra oštećenja ovise o načinu opterećenja pa je

$$d_f = \begin{cases} d_f^t \text{ za } \hat{\sigma}_{11} \geq 0 \\ d_f^c \text{ za } \hat{\sigma}_{11} < 0 \end{cases}, \quad (10)$$

$$d_m = \begin{cases} d_m^t \text{ za } \hat{\sigma}_{22} \geq 0 \\ d_m^c \text{ za } \hat{\sigma}_{22} < 0 \end{cases}, \quad (11)$$

$$d_m = 1 - (1 - d_f^t)(1 - d_f^c)(1 - d_m^t)(1 - d_m^c). \quad (12)$$

Prije nastupanja oštećenja vrijednost operatera oštećenja jednaka je jedinici, pa je prema jednadžbi (8) $\hat{\sigma} = \sigma$.



Slika 30. Hookeov dijagram za vlaknima ojačane kompozite [5]

Kvalitativni Hookeov dijagram za vlaknima ojačane kompozite prikazan je na slici 30. Linearno elastično ponašanje do trenutka nastajanja oštećenja prikazano je na lijevom dijelu dijagrama, pravac sa pozitivnim koeficijentom smjera. Površina ispod krivulje ovog dijagrama predstavlja vrijednost potrošene energije. Nakon nastupanja oštećenja, parametri oštećenja će se mijenjati tako da se dobije desni dio dijagrama na slici. Nakon nastupanja oštećenja parametri oštećenja određenog načina popuštanja poprimaju vrijednost prema jednadžbi

$$d = \frac{\delta_{eq}^f (\delta_{eq} - \delta_{eq}^0)}{\delta_{eq} (\delta_{eq}^f - \delta_{eq}^0)} . \quad (13).$$

U jednadžbi (13) je sa δ_{eq}^f označen ekvivalentni pomak potpunog popuštanja sloja po jednom od spomenuta četiri načina popuštanja. Za svaki od načina popuštanja, ekvivalentni pomak i ekvivalentno naprezanje dani su u izrazima od (4) do (7). Parametar L^c u ovim jednadžbama predstavlja karakterističnu duljinu elementa, koja ovisi o dimenzijama konačnog elementa, a za ljuskasti element se određuje kao korijen njegove površine. Ekvivalentni pomaci u ovom modelu oštećivanja ovise o načinu popuštanja prema izrazima:

- Vlačno opterećenje vlakna ($\hat{\sigma}_{11} \geq 0$) :

$$\delta_{eq}^{ft} = L^c \sqrt{\langle \varepsilon_{11} \rangle^2 + \alpha \varepsilon_{12}^2} , \quad (14)$$

$$\delta_{eq}^{ft} = L^c \frac{\langle \sigma_{11} \rangle \langle \varepsilon_{11} \rangle + \alpha \tau_{12} \varepsilon_{12}}{\frac{\delta_{eq}^{ft}}{L^c}} , \quad (15)$$

- Tlačno opterećenje vlakana ($\hat{\sigma}_{11} < 0$):

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

$$\delta_{eq}^{fc} = \frac{\langle -\sigma_{11} \rangle \langle -\varepsilon_{11} \rangle + \langle -\sigma_{11} \rangle}{\frac{\delta_{eq}^{fc}}{L^C}}, \quad (17)$$

- Vlačno opterećenje matrice ($\hat{\sigma}_{22} \geq 0$):

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

$$\delta_{eq}^{mt} = L^C \frac{\langle \sigma_{22} \rangle \langle \varepsilon_{22} \rangle + \tau_{12} \varepsilon_{12}}{\frac{\delta_{eq}^{mt}}{L^C}}, \quad (19)$$

- Tlačno opterećenje matrice ($\hat{\sigma}_{22} < 0$):

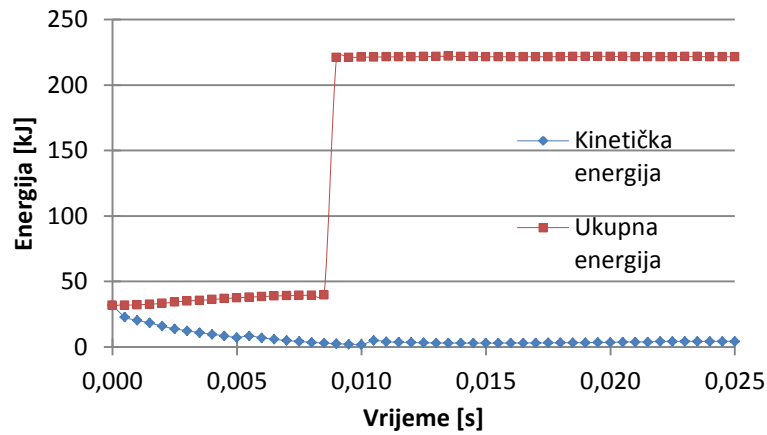
$$\delta_{eq}^{mc} = L^C \sqrt{\langle -\varepsilon_{22} \rangle^2 + \varepsilon_{12}^2}, \quad (20)$$

$$\delta_{eq}^{mc} = L^C \frac{\langle -\sigma_{22} \rangle \langle -\varepsilon_{22} \rangle + \tau_{12} \varepsilon_{12}}{\frac{\delta_{eq}^{mc}}{L^C}}. \quad (21)$$

U jednadžbama (14) do (21) simbol $\langle \rangle$ koristi se kao Macaulayev operator koji je definiran kao $\langle \alpha \rangle = (\alpha + |\alpha|)/2$. Abaqus/Explicit nudi mogućnost modeliranja popuštanja konačnog elementa na osnovu Hashinovog kriterija popuštanja. Ako su svi slojevi kompozita popustili po bilo kojem od načina popuštanja koje pokriva Hashinov kriterij dolazi do popuštanja konačnog elementa.

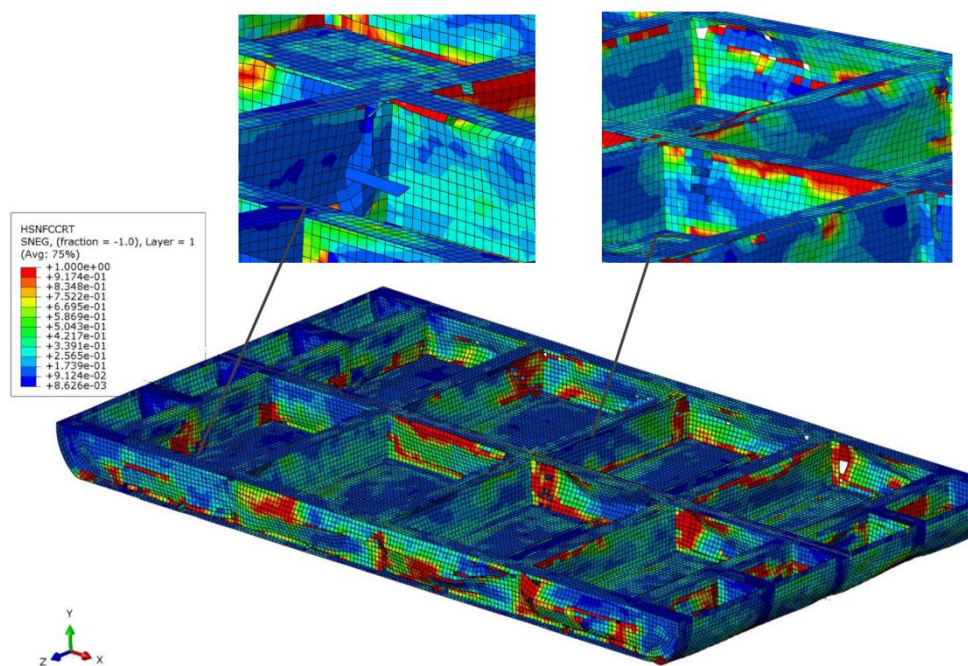
3.4 Rezultati simulacija kompozitnog materijala

U preliminarnim simulacijama, kao što je već spomenuto u poglavlju 3.1. korištenjem 3D elemenata za definiranje ploče dodatne mase rezultiralo je velikim numeričkim nepravilnostima te nepravilnostima deformacije modela. Problem nastaje kad dolazi do pucanja materijala te *solver* numerički teško rješava popuštene elemente i elemente konstrukcije koji ulaze u mrežu ploče. Slika 31 prikazuje skok ukupne energije čime se pokazuje problem u analizi te takve podatke ne možemo prihvatiti.



Slika 31. Energije u preliminarnim analizama kompozitnog modela

Na slici 32 vide se problemi mreže u preliminarnim analizama, te je prikazan Hashinov kriterij popuštanja vlakana u tlačnom smjeru, pri čemu su crveno označena područja gdje bi vlakna kompozita trebala popucati.

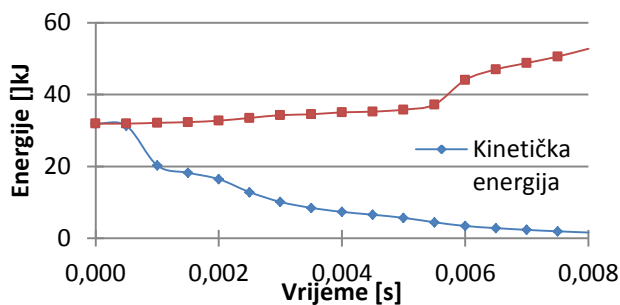


Slika 32. Problemi sa mrežom konačnih elemenata u preliminarnim analizama.

Konture prikazuju vrijednosti Hashinovog kriterija popuštanja vlakana pri tlačnom opterećenju na kraju analize.

Nakon prilagodbe modela navedene u poglavlju 3.1. javljale su se dodatne nepravilnosti u skokovima energije ali manjeg obujma (slika 33). Rezultat ovog skoka možemo pripisati numeričkom zapisu sa jednostrukom preciznošću (32 bita) pri čemu zbog velikih deformacija

i nepravilnosti *solver* ne daje ispravne rezultate. Prelaskom da dvostruku preciznost (64 bita) analiza je pokazala podatke koje možemo smatrati dovoljno prihvatljivim.



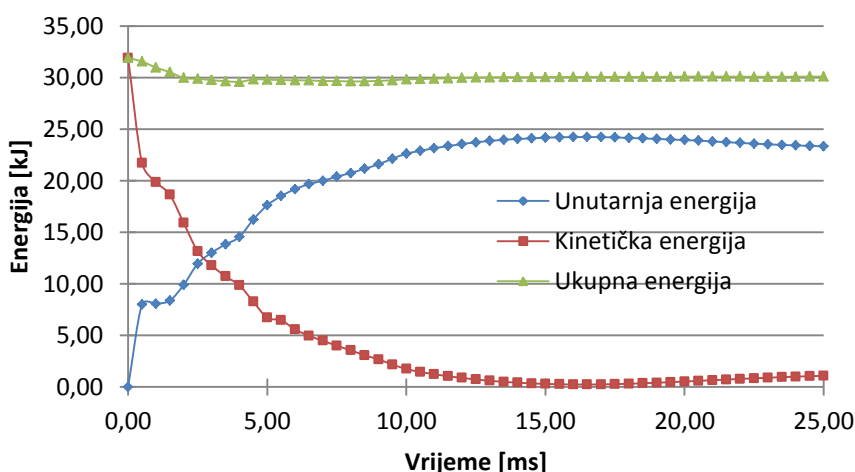
Slika 33. Energije u preliminarnim kompozitnim analizama

Analiza konvergencije mreže kompozitnih materijala nije rađena jer analize traju jako dugo, a na temelju dimenzija elemenata i debljine ljuske kojom se modeliraju pojedini dijelovi konstrukcije zaključeno je da bi numerički model trebao dovoljno dobro opisati realnu konstrukciju.

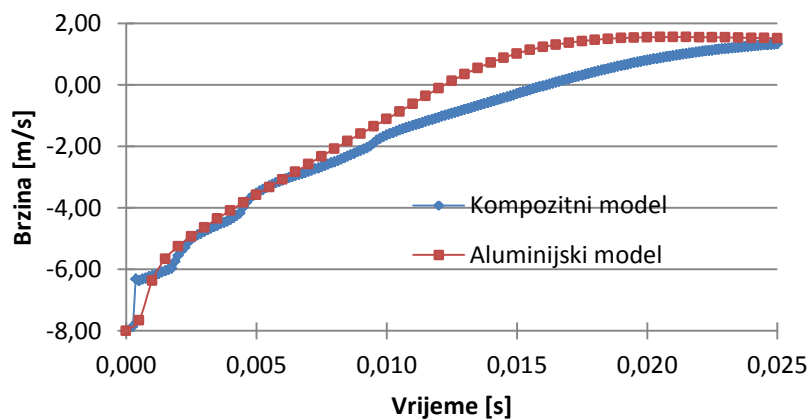
Također, konvergencija rješenja teško bi se mogla postići u ovako kompleksnim analizama s obzirom na činjenicu da pri brisanju pojedinih elemenata dolazi do stvaranja novih kontaktnih površina i daljnji tijek analize ovisio bi o tom procesu, koji je uvjetovan gustoćom mreže.

Na temelju danih komentara možemo prikazati dobivene rezultate sa zaključkom da bi dobivena analiza trebala dobro prikazati realnu konstrukciju.

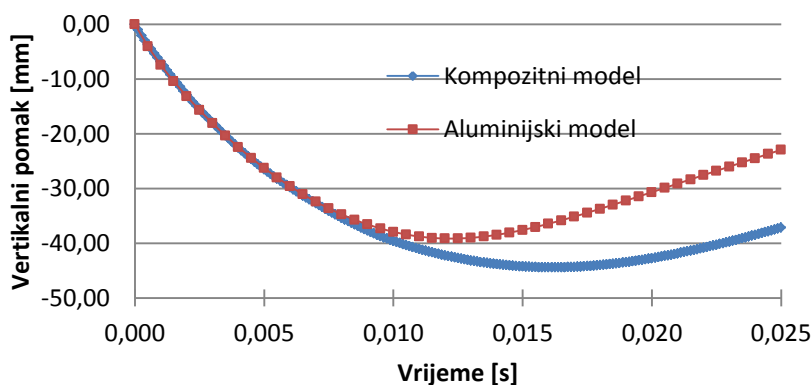
Rezultati konačne analize kompozitne konstrukcije prikazani su na sljedećim slikama. Slika 34 pokazuje očekivano ponašanje energija u analizi, koje možemo usporediti sa rezultatima aluminijskog modela (slike 21, 22 i 23).



Slika 34. Iznosi energija u analizi kompozitnog modela



Slika 35. Dijagram usporedbe smanjenja brzine kompozitnog i aluminijskog modela

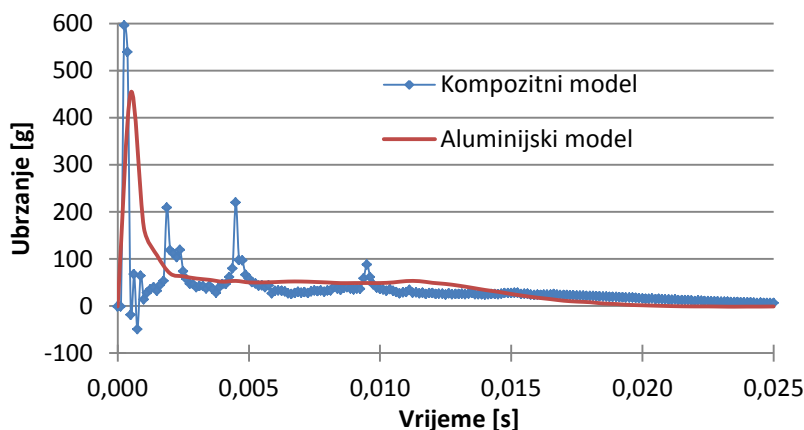


Slika 36. Dijagram usporedbe vertikalnog pomaka ploče na kompozitnom i aluminijskom modelu

Dijagrami brzina i pomaka (slika 35 i 36) relativno se dobro slažu uspoređeni s podacima aluminijskog modela, pri čemu se povratni odziv kompozitne konstrukcije događa nešto kasnije u odnosu na aluminijski model (oko 16 milisekunde naspram 12,5 milisekunde aluminijskog modela). Vertikalni pomak je nešto veći i s obzirom na kasniji odziv konstrukcije, povoljniji je učinak na prigušenje udara konstrukcije.

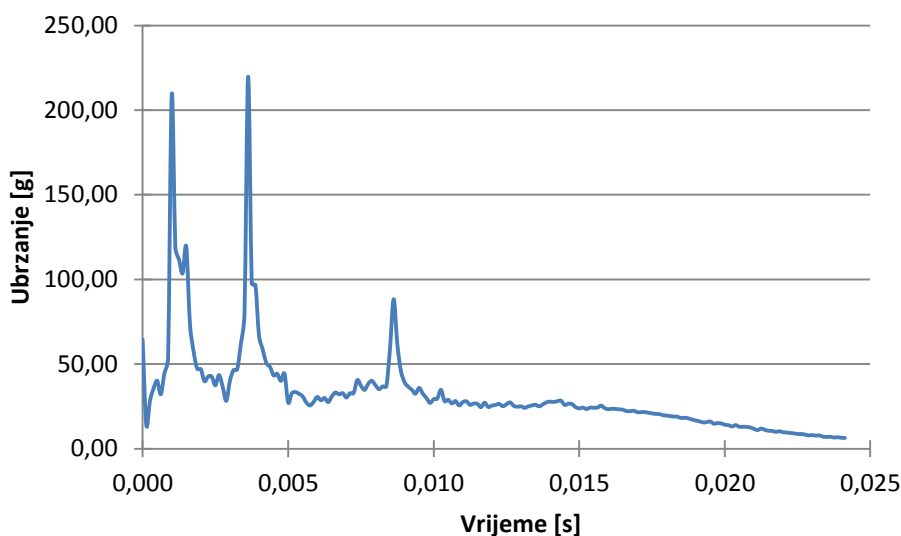
Brzine su poprilično slične također. Primjetan je utjecaj kasnijeg odziva konstrukcije i većeg vertikalnog progiba, linearnijom krivuljom smanjenja brzine (slika 36).

Dijagram ubrzanja (slika 37) pokazuje početnu visoku razinu ubrzanja, ali u jako kratkom vremenu, što gledano prema Eiband krivuljama, nije problematično s pogleda opterećenja na ljudsko tijelo. Ako podatke usporedimo sa aluminijskim modelom, kompozitni model pokazuje znatno bolja svojstva prigušenja udara.



Slika 37. Ubrzanje točke ploče na kompozitnoj i aluminijskoj konstrukciji

Izuzmemo li početni skok ubrzanja, prosječno ubrzanje u periodu od 0.01s iznosi oko 35 g (slika 38), što je još uvijek visoka vrijednost, te se po Eiband krivuljama (slika 44) nalazi u području umjerenih do teških povreda za putnike. Kompozitni model pokazuje znatno manja ubrzanja na konstrukciji. U odnosu na aluminijski model, kod kojeg se prosječno ubrzanje kreće oko 50 g, kompozitna konstrukcija pokazuje 30% manja g ubrzanja.



Slika 38. Prosječno ubrzanje za kompozitni model

Na slici 39 prikazana je raspodjela ekvivalentnog Von Mises naprezanja, prije i nakon povratnog odziva. Mjesta pucanja kompozitnog materijala su vertikalni elementi konstrukcije, te oplata na nekim mjestima. Oplata puca zbog svoje male debljine, iako ona jako malo sudjeluje u apsorpciji udara pri vertikalnom udaru o tvrdo tlo.

Slika 40 prikazuje raspodjele indeksa Hashinovog kriterija popuštanja po načinu tlačnog opterećenja vlakana. Iznos indeksa popuštanja računa se za svaki jednousmjereni sloj, a kad

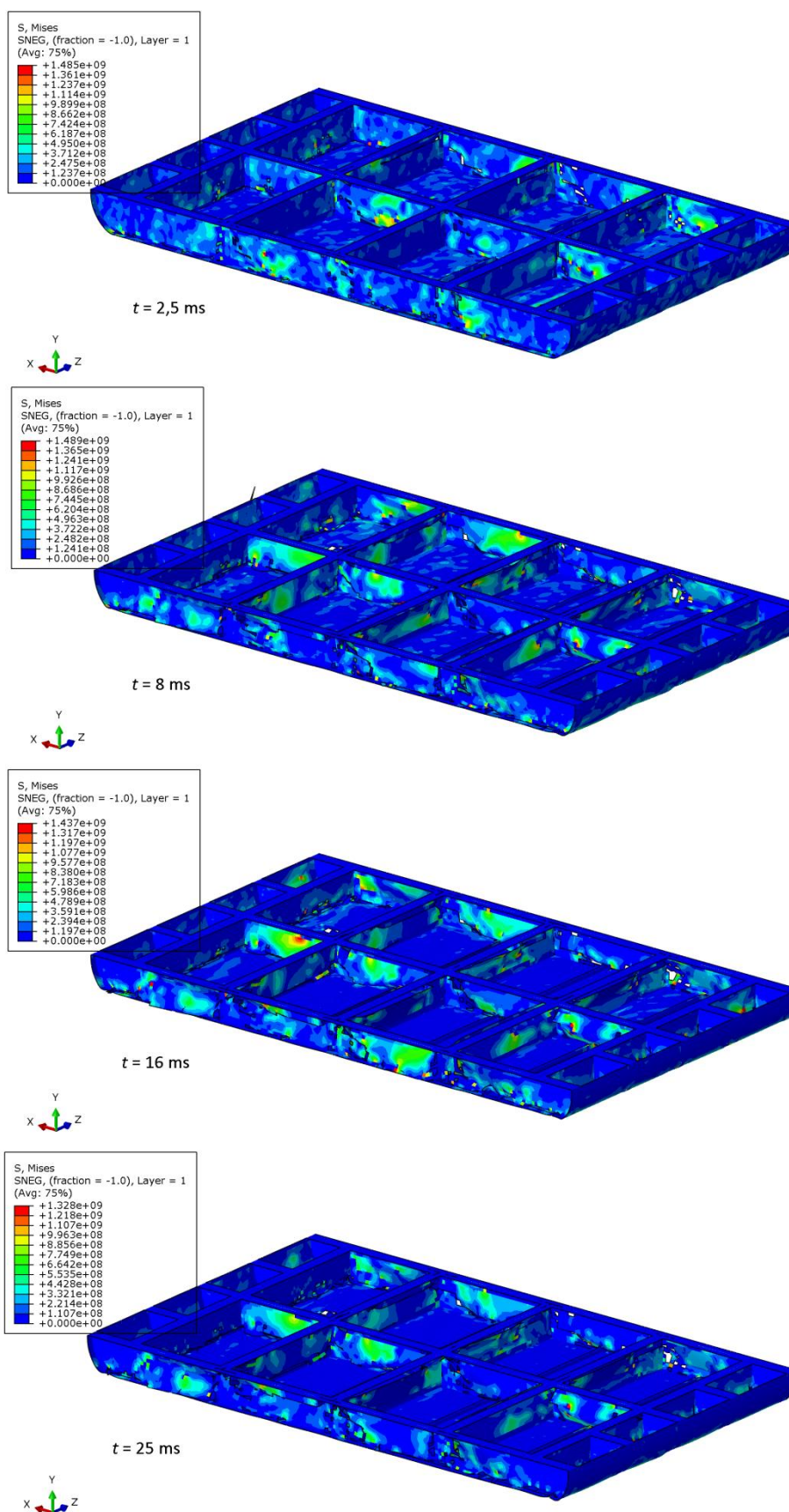
indeks postane jednak jedinici dolazi do popuštanja sloja po načinu popuštanja čiji je indeks popuštanja prvi dosegao jediničnu vrijednost. Isto vrijedi i za raspodjele indeksa Hashinovog kriterija popuštanja po načinu vlačnog opterećenja matrice prikazane na slici 41.

Na poprečnim i uzdužnim elementima vidimo obrisane elemente koji su dosegli granicu popuštanja. . Osim pucanja kompozita došlo je i do odvajanja pojedinih segmenata. Naočitije je to na spojevima vertikalnih elemenata sa gornjim dijelom konstrukcije.

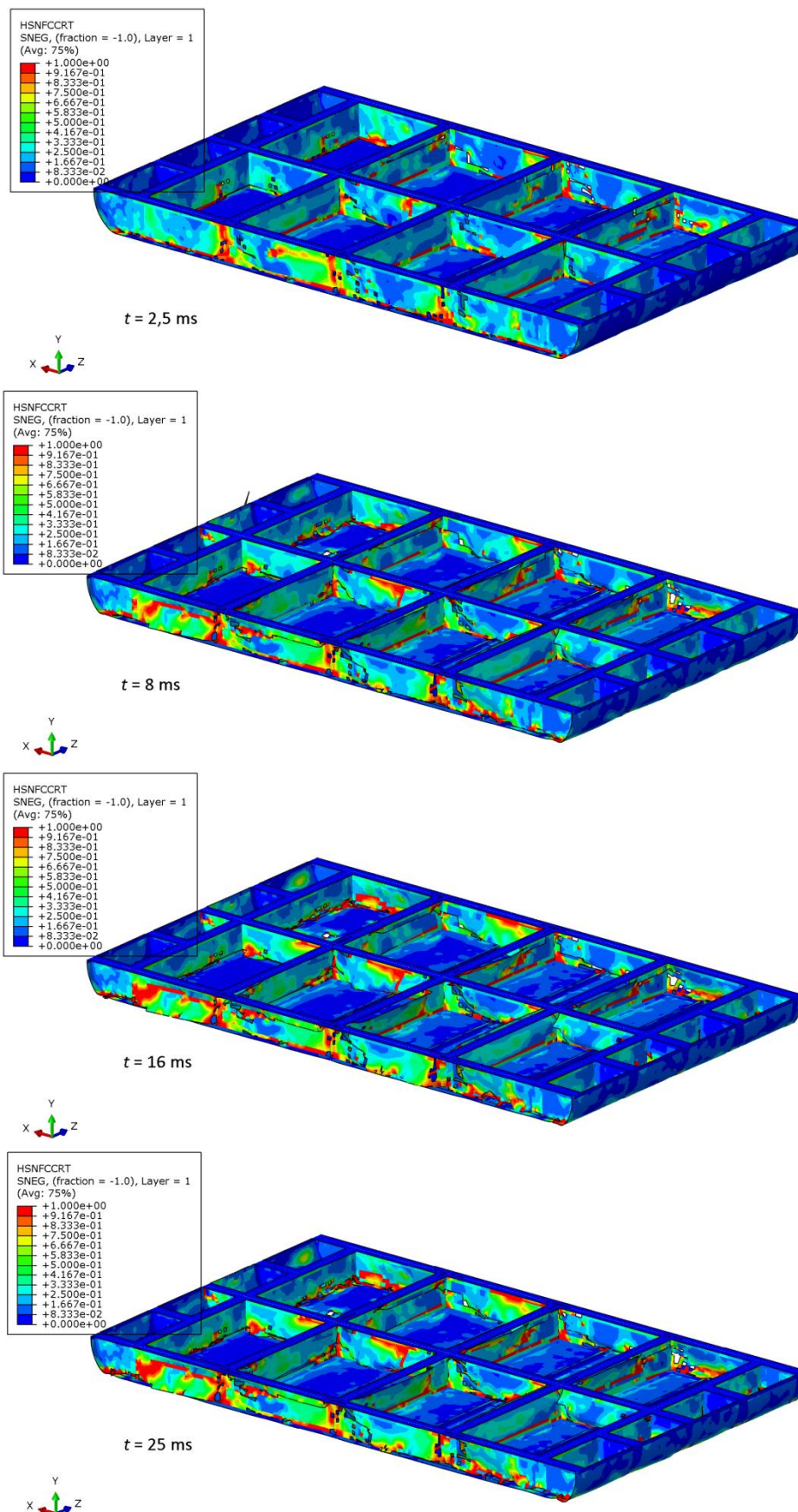
Slika 42 i 43 prikazuju tlačno, odnosno vlačno popuštanje matrice kompozitnog materijala, pri čemu je vlačno popuštanje izrazito veliko.

Slika 44 prikazuje jedan od parametara Hashinovg kriterija oštećivanja kompozitnog materijala, kriterij vlačnog oštećenja matrice materijala.

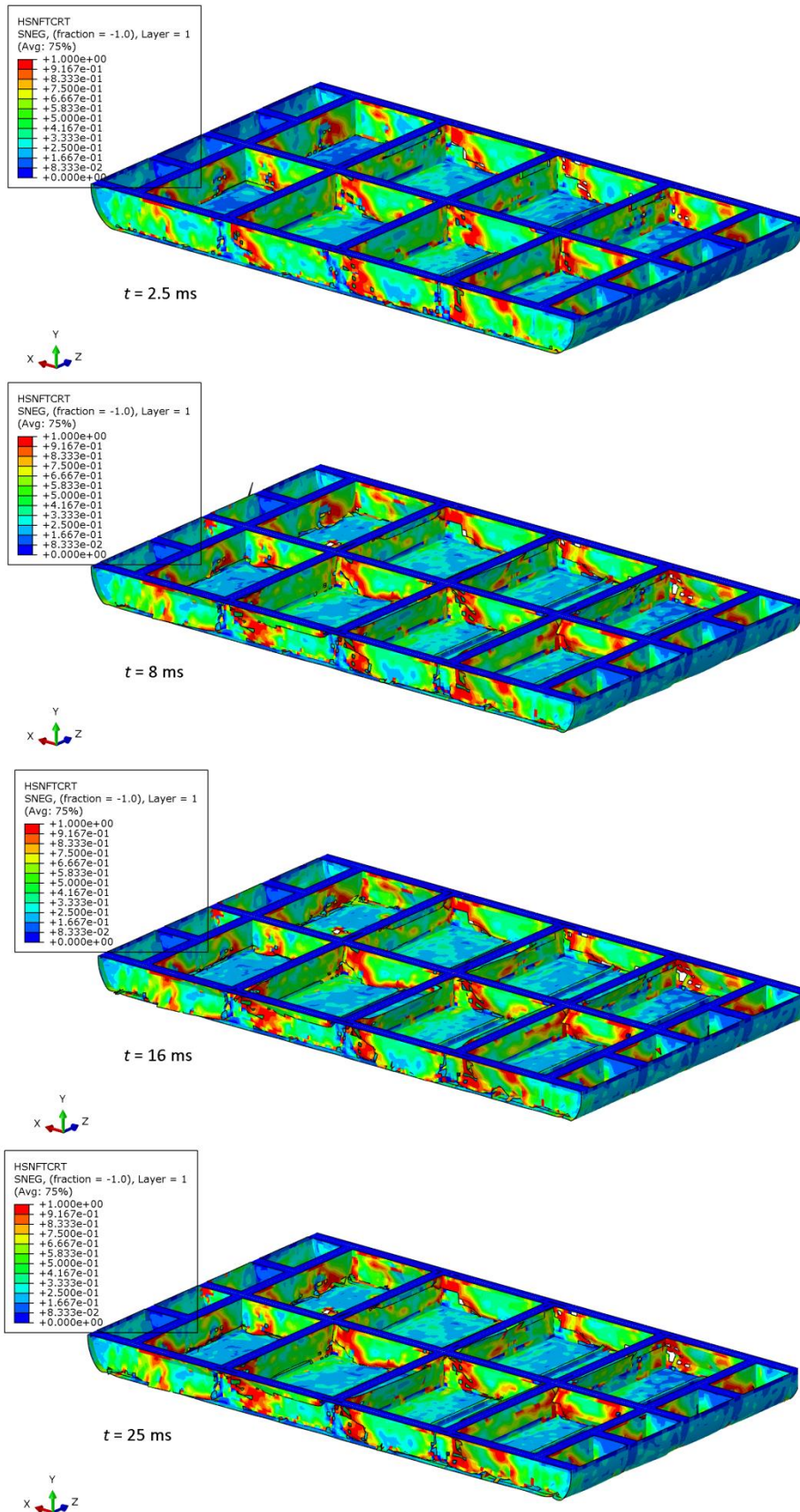
U slikama se vidi da dolazi do popuštanja svih slojeva kompozita po nekom od kriterija popuštanja.



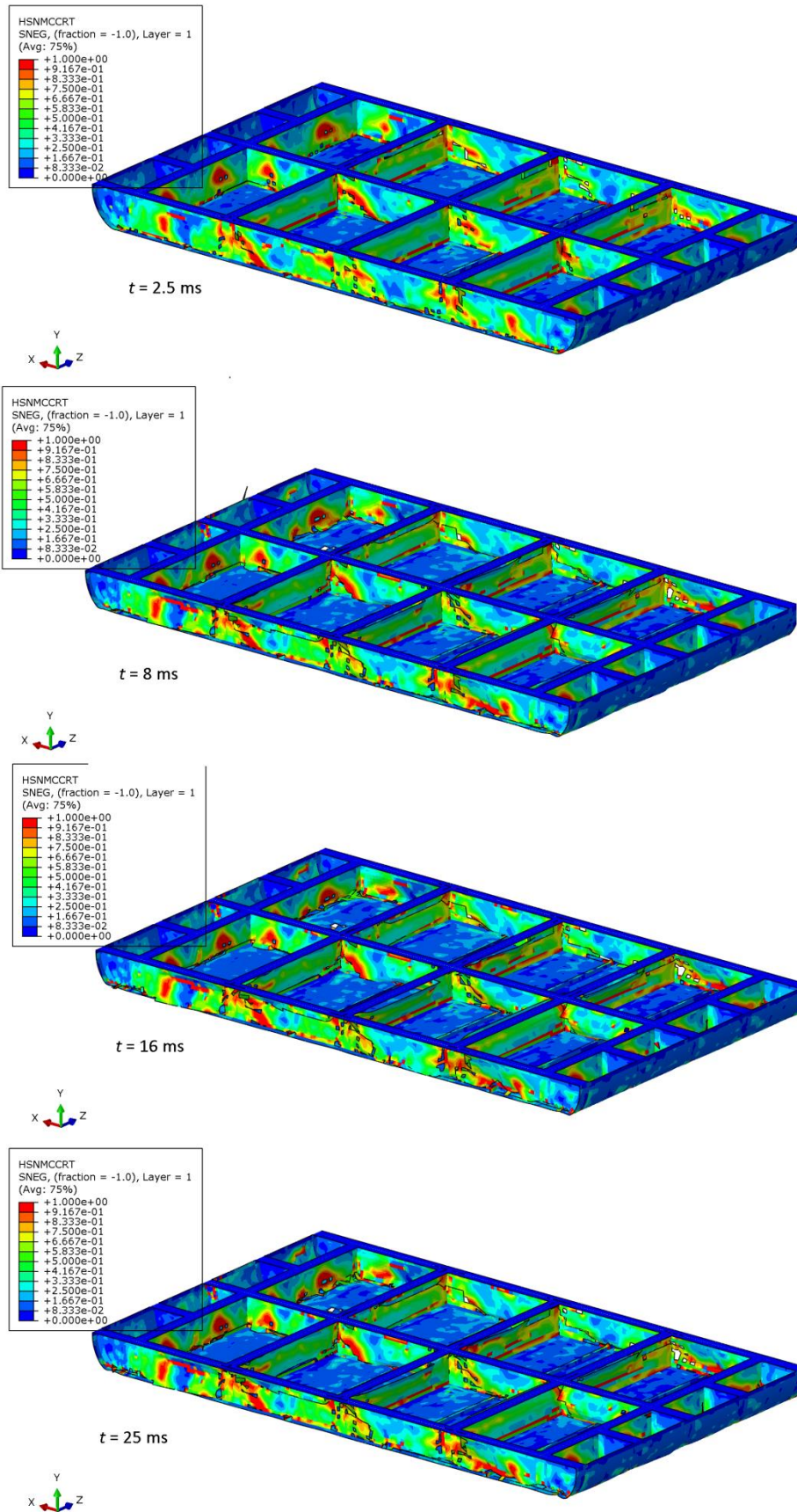
Slika 39. Raspodjela ekvivalentnog Von Mises napreznja u određenim trenucima analize kompozitnog modela [MPa]



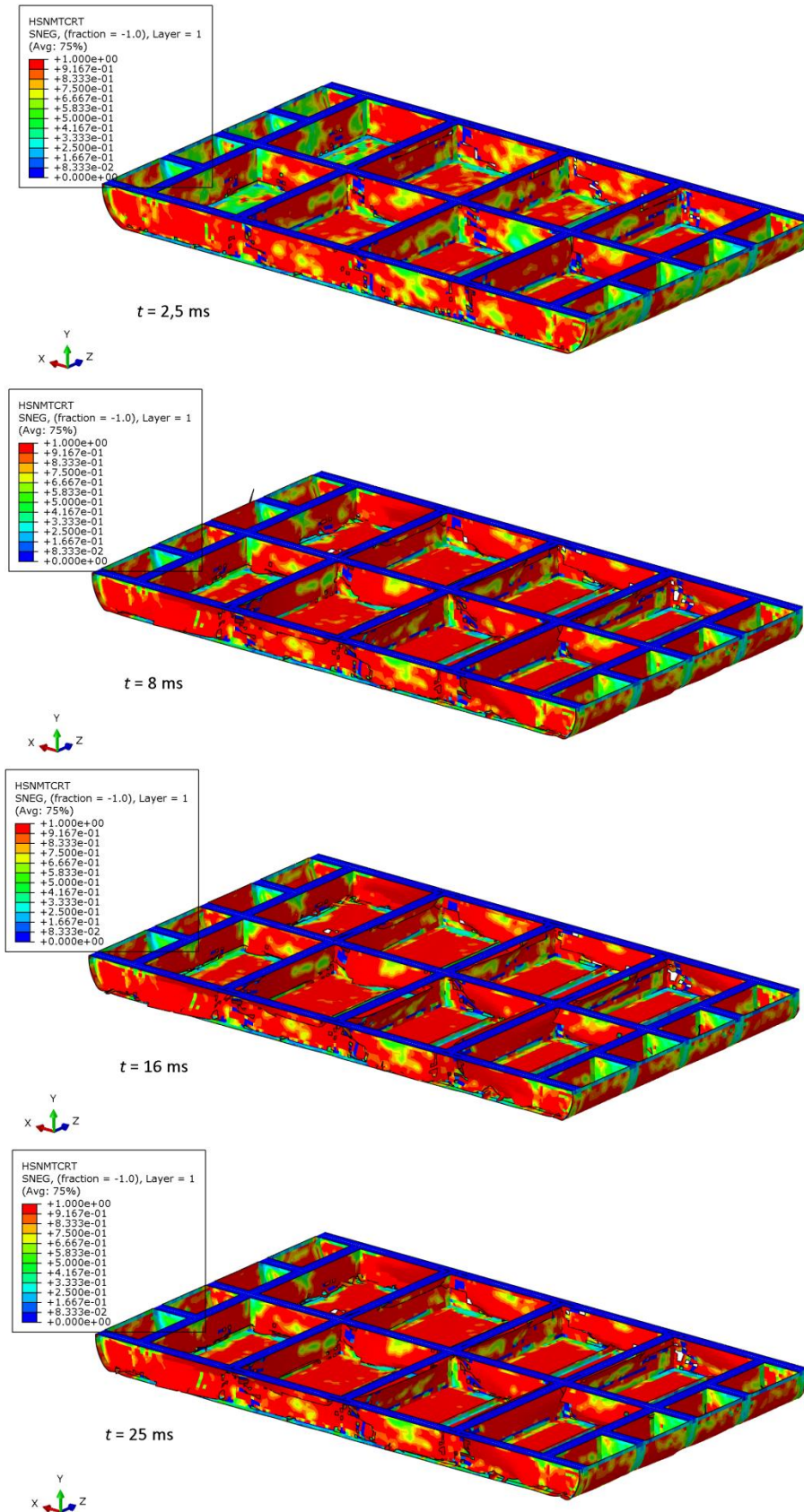
Slika 40. Vrijednosti indeksa Hashinovog kriterija tlačnog popuštanja vlakna u donjim slojevima materijala konstrukcije



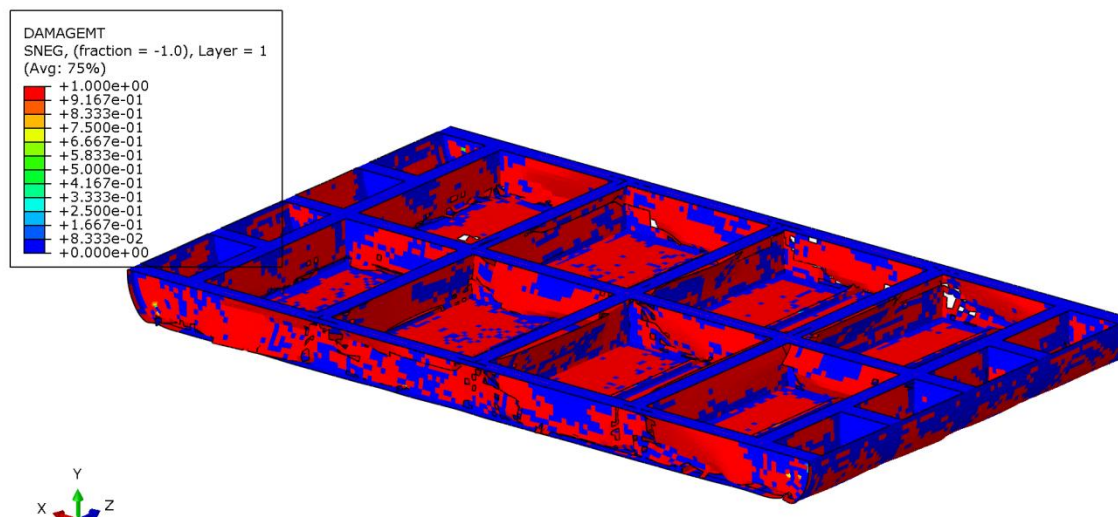
Slika 41. Vrijednosti indeksa Hashinovog kriterija vlačnog popuštanja vlakna u donjim slojevima materijala konstrukcije



Slika 42. Vrijednosti indeksa Hashinovg kriterija tlačnog popuštanja matrice u donjim slojevima materijala konstrukcije



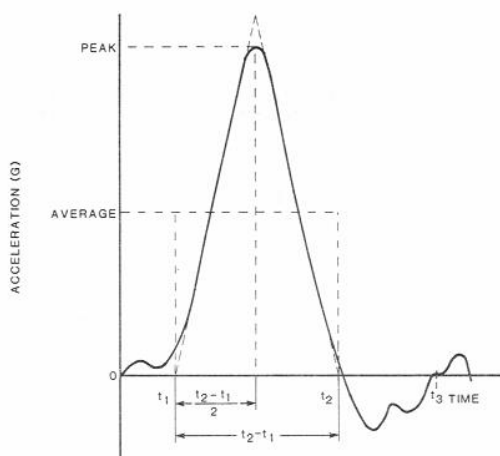
Slika 43. Vrijednosti indeksa Hashinovg kriterija vlačnog popuštanja matrice u donjim slojevima materijala konstrukcije



Slika 44. Vrijednosti indeksa Hashinogv kriterija nastajanja vlačnog oštećenja matrice u donjim slojevima materijala konstrukcije (25 ms analize)

4 Eiband krivulje

Akceleracija u sudarima ili udarima o tlo, može biti izražena u g jedinicama (u nekoj literaturi G) koje predstavljaju omjer ubrzanja objekta u odnosu prema gravitacijskoj akceleraciji na nadmorskoj visini u razini mora. Prema [5] i [11] ubrzanje prilikom sudara, odnosno udara o tlo, može se opisati kao trokutasti impulsni udar (slika 45).

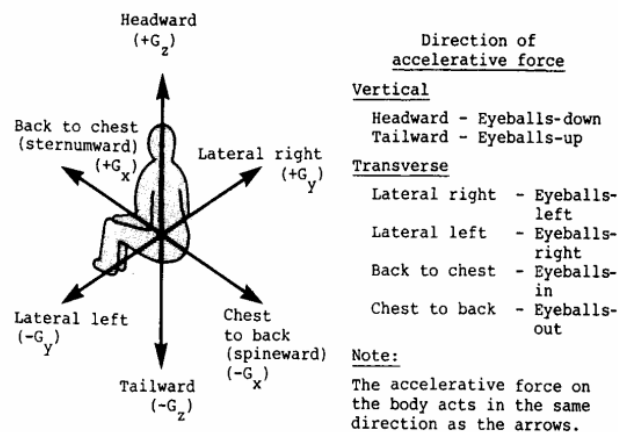


Slika 45. Trokutasti impulsni signal udara [11]

Ovakav prikaz pulsa udara pojednostavljuje kalkulacije u većini zrakoplovnih i automobilskih sudara. 1959. godine na temelju eksperimentalnih testiranja, razvijene su tzv. Eiband krivulje, odnosno krivulje tolerancije ljudskog tijela. Podaci su temeljeni primarno na rezultatima

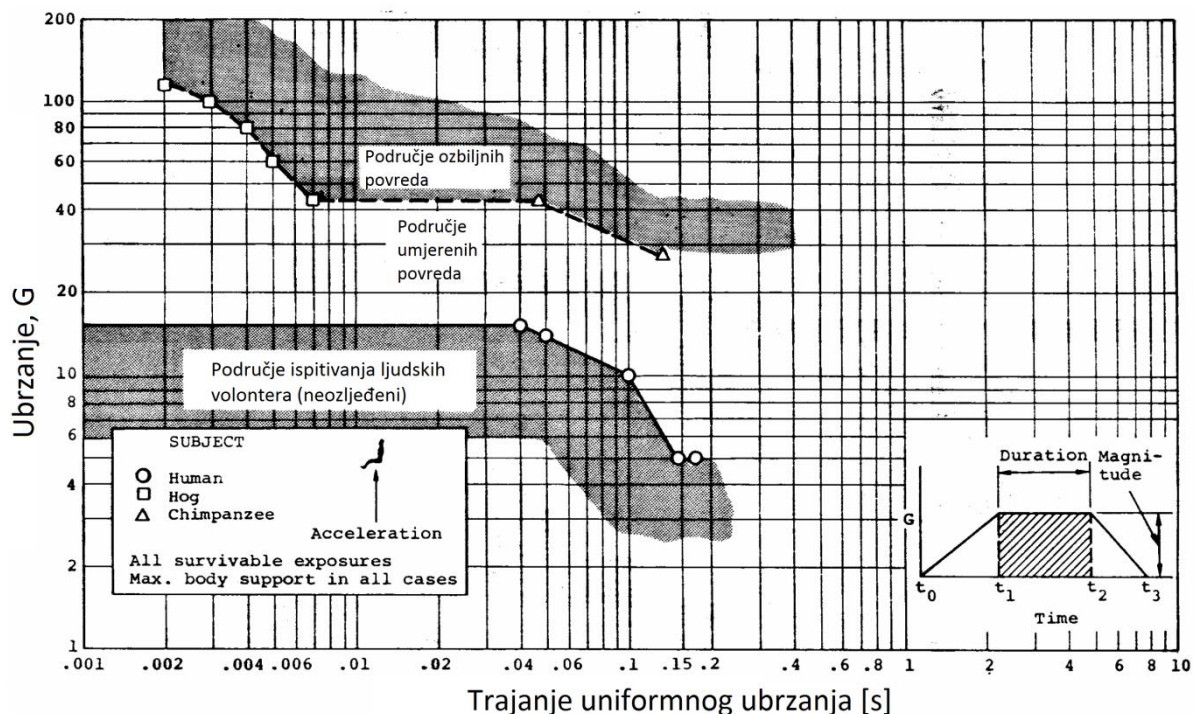
eksperimentalnog testiranja pukovnika John Stapp-a, koji je eksperimente vršio na sebi, svojim kolegama i na ljudskim (živim) volonterima. Eksperimente je vršio radeći posebne uređaje za oponašanje ubrzanja prilikom raznih obrazaca udara (vertikalni, horizontalni...). Uz ljudske volontere, pokusi su rađeni i na majmunima i svinjama koji su poslužili kao ljudski surrogati u područjima ubrzanja koja prelaze u granice umjerenih i ozbiljnih povreda.

Slika 46 prikazuje koordinatni sustav čovjeka i smjer ubrzanja te djelovanja inercijskih sila preko pomaka očnih jabučica (eng. *eyeballs*). Akceleracija u jednom smjeru uzrokuje inercijske sile jednako snažne u suprotnom smjeru.



Slika 46. Koordinatni sustav čovjeka i sile ubrzanja na tijelo [11]

Slika 47 pokazuje Eiband krivulje za ubrzanja u $+G_z$ osi definirane u slici 46, a analogna je smjeru sile koje pilot osjeća prilikom izbacivanja sjedala ili prilikom vertikalnog udara helikoptera o tlo. To je krivulja uniformnih ubrzanja letjelice u odnosu na trajanje tog istog ubrzanja, do otprilike 150 milisekundi. Vidimo i krivulju koja pokazuje preživljivost čovjeka bez ozljeda, s time da su testiranja vršena na skoro idealiziranom sjedalu i uz potpunu upotrebu zaštitnih pojaseva, kako bi se tijelo pri udaru što manje kretalo.



Slika 47. Eiband krivulja za +Gz akceleraciju [11]

Volonteri su u testiranju tolerirali ubrzanja do 18 g bez ozljeda. Ozljeda kralježnice ne pojavljuje se na ubrzanjima manjim od otprilike 20-25 g. Vidimo da je osim veličine g ubrzanja, još važnije trajanje opterećenja. Kratkotrajni impuls velikih akceleracija malo utječe na ljudsko tijelo. Prema tablici 9, uz napomenu da je vrijeme trajanja opterećenja 0.10 sekundi, tijelo kod vertikalnog udara može izdržati 20-25 g bez ozbiljnih ozljeda.

Tablica 9. Tablica ljudskih tolerancija na g opterećenja [11]

Smjer sile ubrzanja	Inercijska reakcija tijela	Granica tolerancije
+Gz (vertikalno gore)	Očne jabučice dolje	20-25 g
-Gz (vertikalno dolje)	Očne jabučice gore	15 g
+Gy (lateralno desno)	Očne jabučice lijevo	20 g
-Gy (lateralno lijevo)	Očne jabučice desno	20 g
+Gx (od leđa prema prsima)	Očne jabučice van	45 g
-Gx (od prsa prema leđima)	Očne jabučice unutra	45 g

Stoga se pri konstruiranju zrakoplova i vozila, pokušava ubrzanje pri sudarima svesti u granice preživljivosti putnika. Vrlo je važna i upotreba zaštitnih pojaseva koja onemogućava kretanje tijela po deformiranom vozilu, i samim time smanjuje rizike od ozljeda.

Eiband krivulje služe samo kao orijentacijska mjera kod ispitivanja preživljivosti posade. Ostali faktori uključuju i deformaciju konstrukcije u kojem se posada nalazi, upotreba zaštitnih pojaseva, upotreba zračnih jastuka, te pogotovo kod zrakoplova i helikoptera upotreba sjedala s mogućnošću apsorpcije udara. Sjedala sa mogućnošću apsorpcije energije udara koje smanjuju g sile koje tijelo trpi koriste se u većini modernih helikoptera i zrakoplova.

5 Zaključak

Preživljivost posade helikoptera uvelike ovisi o konstrukciji poda helikoptera, upotrebi sjedala koja apsorbiraju udare, upotrebi zaštitnih pojaseva te načinu konstrukcije ostatka helikoptera kako ne bi došlo do sloma konstrukcije oko pilota i posade.

Prema podacima dobivenim za aluminijski model poda helikoptera, ubrzanja koje bi posada morala izdržati prelazi, prema Eiband krivuljama u područje ozbiljnih ozljeda. Prosječno ubrzanje kroz period od 12 ms iznosi oko 50 g. Ubrzanje model u analizi slično je onome iz [3]. Ako to usporedimo s podacima za kompozitnu konstrukciju dobivamo podatke od 35 g. Što znači da je apsorpcija kompozitne konstrukcije nešto bolja, ali su ubrzanja još uvijek visoka.

Najveći problem kod konstruiranja poda helikoptera predstavlja njegov mali manevarski prostor za apsorpiranje udara (do 200 mm vertikalnog progiba). U 200 mm treba usporiti udar od predvidivih 8 m/s tako da obrazac usporavanja bude što povoljniji za putnike i posadu.

Numerička analiza aluminijske konstrukcije pokazala je da materijalni model daje poprilično dobre rezultate usprkos uvedenim pojednostavljenjima. To je dijelom i zbog samog mehanizma plastifikacije metalnih materijala koja je već poznata i eksperimentalnim putem određena i potvrđena.

Što se tiče same metalne konstrukcije poda helikoptera, potrebno je omogućiti postepeno apsorpiranje udara drugačijom izvedbom spojeva glavnih elementa, jer oni predstavljaju mjesta najveće krutosti. Omogućavanje postepenog popuštanja poda helikoptera uvelike bi popravilo apsorpiranje udara. Jedan od predloženih načina bio bi konstrukcijska izvedba s inicijatorima popuštanja na kritičnim mjestima, čime bi se spriječilo jednostruko stvaranje plastične zone konstrukcije po svojoj visini, već bi omogućilo gnječenje materijala te time na određen način poboljšala apsorpcija udara. Ali uvođenjem mehanizama inicijacije popuštanja možda bi se ugrozio stabilnost konstrukcije pri npr. grubom slijetanju. Izrada konstrukcije koja omogućuje dobru apsorpciju udara ovisi o tome koji će se aspekt konstruiranja žrtvovati (veća masa, manja krutost pojedinih dijelova, itd.). Numerička analiza uvelike pomaže u tome, pogotovo kad znamo da numerički modeli pojedinih materijalnih modela, kao navedeni aluminijski model konstrukcije poda helikoptera, pokazuje dobru usporedbu sa stvarnim konstrukcijama. Predvidivost odziva kritičnih elemenata omogućava implementaciju raznih konstrukcijskih rješenja prije same izrade letjelice.

Numeričko modeliranje kompozitne konstrukcije u ovom radu pokazalo je kompleksnost kod mehanizmima popuštanja kompozitnog materijala. Popuštanjem materijala dolazi do brisanja elemenata te stvaranja novih kontaktnih površina i daljnji tijek analize ovisi o tom procesu. Dobiveni rezultati trebali bi dobro oponašati ponašanje realne kompozite konstrukcije sa ovakvim načinom opterećenja. Eventualna daljnja analiza uključivala bi ubacivanje dobrog modela sjedala helikoptera koji bi svojom konstrukcijskom izvedbom omogućavao oponašanje apsorpiranja udara. Time bi zapravo dobili bolje podatke što se događa na samom sjedalu pilota prilikom udara, i omogućili točniju procjenu preživljavanja posade.

Literatura

- [1] Jacskon K.E., Fasanela E.L., Lyle K.H., :*Crash Certification by Analysis – Are We There Yet*, Hampton, SAD.
- [2] Hughes K., Vignjevic R., Campbell J. : *Experimental observations of an 8 ms drop test of a metallic helicopter underfloor structure onto a hard surface part 1*, Journal of Aerospace Engineering, 2007.
- [3] Hughes K., Vignjevic R., Campbell J.: *Application of the finite element method to predict the crashworthy response of a metallic helicopter underfloor structure onto a hard surface*; International Journal of Crashworthiness, 2007.
- [4] Hughes K., Vignjevic R., Campbell J.: *Experimental observations of an 8 ms drop test of a metallic helicopter underfloor structure onto water part 2*, Journal of Aerospace Engineering, 2007.
- [5] Billac T., David M., Battley M., Das R., Thomson R., Kindevater C.:*Multi-terrain impact simulations of a crashworthy composite helicopter subfloor*, 29th Congres of the International Council of the Aeronautical Sciences, St. Petersburg, 2014.
- [6] *Numerical Simulation of Helicopter Cockpit Seat subjected to Crash Impact*, Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology 5(1) 72-78, 2013.
- [7] Ivančević D.: *Analiza udarnih oštećenja zakrilca velikog putničkog aviona*, Diplomski rad, 2008., Zagreb.
- [8] Vježbe iz kolegija *Čvrstoća kompozitnih zrakoplovnih konstrukcija*, FSB, 2015.
- [9] Smojver I.: *Mehanika kompozitnih materijala*, Zagreb, 2007.
- [10] Abaqus analysis user manual. Dassault Systemes 2014.
- [11] Shanahan D.F.: *Human tolerances and crash survivability*, Madrid, 2004.

PRILOZI

- I. CD-R disc