

# Numerička analiza helikoptera s kompozitnom konstrukcijom poda pri udaru u tlo

---

**Popović, Marija**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2020**

*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:235:254398>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-04-18**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Marija Popović**

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

Doc. dr. sc. Darko Ivančević, mag. ing. aeroing.

Student:

Marija Popović

Zagreb, 2020.

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

Prvo bih se voljela zahvaliti svojoj obitelji koji su me uvijek podržavali u tome da se bavim onime što me zanima i koji su mi bili velika podrška tokom studija.

Zatim bi se htjela zahvaliti svim svojim prijateljima; curama koje su bile uz mene od samog početka i za koje ću uvijek biti njihova strojarka, Penzićima s kojima je i učenje bilo užitak te mojim personama koje su mi pokazale da se i faks može završiti sa stilom.

Velika hvala mom dečku Domagoju, koji je bio uz mene uz sve prolaze i padove te bez kojeg ove godine studija nisu zamislive.

Na kraju najviše hvala mom mentoru Darku Ivančeviću, zbog kojeg smo se svi zainteresirali za kompozite i koji je svojim strpljenjem i upornošću pokazao još jednom kolika je osoba.

Hvala svima!

Marija Popović



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<br>Fakultet strojarstva i brodogradnje |         |
| Datum:                                                       | Prilog: |
| Klasa: 602 - 04 / 20 - 6 / 3                                 |         |
| Ur. broj: 15 - 1703 - 20 -                                   |         |

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Marija Popović** Mat. br.: 0035199671

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Numerička analiza helikoptera s kompozitnom konstrukcijom poda pri udaru u tlo**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Numerical analysis of ground impact of a helicopter with a composite floor structure**

Opis zadatka:

U radu je potrebno provesti numeričku analizu udara konstrukcije helikoptera u tlo s ciljem određivanja sila kojima je u tom slučaju izložena posada helikoptera. Konstrukciju helikoptera je potrebno modelirati pojednostavljeno razmatranjem dijela konstrukcije helikoptera u kojoj je smještena posada. U radu je potrebno provesti analizu utjecaja izvedbe podnice helikoptera na iznose sila kojima je opterećena posada.

U okviru diplomskog rada potrebno je:

- provesti pregled literature u području udarnih analiza helikopterskih konstrukcija s ciljem odabira postavki numeričkog modela,
- izraditi numerički model pojednostavljene konstrukcije helikoptera,
- numeričku analizu provesti u programu *Abaqus/Explicit*,
- provesti validaciju numeričkog modela primjenom dostupnih rezultata eksperimenata iz literature,
- kritične dijelove konstrukcije modelirati detaljno, uzimajući u obzir utjecaj koncentracije naprezanja koja nastaje načinom spajanja pojedinih dijelova konstrukcije,
- u nastavku rada, odrediti utjecaj izvedbe podnice helikoptera na sile kojima je opterećena posada pri udaru u tlo,
- podnicu modelirati na dva načina – kao monolitnu i kao sendvič konstrukciju uzimajući u obzir svojstva materijala koji se koriste za tu svrhu u realnim konstrukcijama.

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

Zadatak zadan:

5. ožujka 2020.

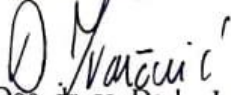
Datum predaje rada:

7. svibnja 2020.

Predviđeni datum obrane:

11. – 15.5.2020.

Zadatak zradio:

  
Doc. dr. sc. Darko Ivančević

Predsjednica Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

**SADRŽAJ**

|                                   |      |
|-----------------------------------|------|
| SADRŽAJ .....                     | I    |
| POPIS SLIKA .....                 | II   |
| POPIS TABLICA .....               | V    |
| POPIS OZNAKA .....                | VI   |
| SAŽETAK .....                     | VIII |
| SUMMARY .....                     | IX   |
| 1. Uvod .....                     | 1    |
| 2. Westland WG30 helikopter ..... | 4    |
| 3. Numerička analiza .....        | 12   |
| 4. Kompozitna konstrukcija .....  | 21   |
| 5. Rezultati .....                | 40   |
| 6. ZAKLJUČAK .....                | 60   |
| LITERATURA .....                  | 61   |
| PRILOZI .....                     | 62   |

## POPIS SLIKA

|           |                                                                                                        |    |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 1.  | Koordinate helikoptera u letu [1] .....                                                                | 1  |
| Slika 2.  | Koordinatni sustav čovjeka u sjedećem položaju [1] .....                                               | 1  |
| Slika 3.  | Krivulja "impulsa udara" [1] .....                                                                     | 2  |
| Slika 4.  | Eiband krivulja u + $G_z$ smjeru [1] .....                                                             | 3  |
| Slika 5.  | <i>Westland WG30</i> [3] .....                                                                         | 4  |
| Slika 6.  | Tipična konstrukcija poda [6] .....                                                                    | 6  |
| Slika 7.  | Položaj modelirane komponente poda u odnosu na ostatak konstrukcije [5] .....                          | 7  |
| Slika 8.  | Lokacija komponente poda u odnosu na ostatak konstrukcije putničkog dijela trupa helikoptera [4] ..... | 7  |
| Slika 9.  | Detaljan shematski prikaz odjeljka popraćen slikama konstrukcije poda [4] .....                        | 8  |
| Slika 10. | Postava eksperimenta [4] .....                                                                         | 9  |
| Slika 11. | Shematski prikaz eksperimenta, dimenzije su u mm [4] .....                                             | 10 |
| Slika 12. | Globalni pogled segmenta poda nakon eksperimenta [5] .....                                             | 11 |
| Slika 13. | CAD model aluminijskog dijela poda helikoptera, dimenzije su u [mm] .....                              | 13 |
| Slika 14. | Model poda s različito dodijeljenim debljinama .....                                                   | 14 |
| Slika 15. | Sklop numeričkog modela .....                                                                          | 14 |
| Slika 16. | Mreža konačnih elemenata modela poda helikoptera .....                                                 | 15 |
| Slika 17. | Rubni uvjeti i opterećenja poda helikoptera pri udaru u tlo .....                                      | 17 |
| Slika 18. | Povezivanje okvira i oplata <i>tie</i> vezama .....                                                    | 17 |
| Slika 19. | Potrebna duljina zakovice [10] .....                                                                   | 18 |
| Slika 20. | Modeliranje spojnog elementa [10] .....                                                                | 19 |
| Slika 21. | Ukrute L profila i okvir "STN450F" .....                                                               | 20 |
| Slika 22. | Numerički model konstrukcije zakovicama .....                                                          | 20 |
| Slika 23. | Načini popuštanja kompozita [13] .....                                                                 | 22 |
| Slika 24. | Globalni i glavni materijalni koordinatni sustav [13] .....                                            | 22 |
| Slika 25. | <i>Hookeov</i> dijagram za vlaknima ojačan kompozit [9] .....                                          | 24 |
| Slika 26. | Struktura <i>sandwich</i> kompozita [12] .....                                                         | 26 |
| Slika 27. | Deformacije <i>sandwich</i> ploče u xz ravnini [13] .....                                              | 27 |
| Slika 28. | Geometrija <i>sandwich</i> ploče [13] .....                                                            | 27 |
| Slika 29. | Transformacija vlakana [13] .....                                                                      | 28 |

|           |                                                                                                                                                                           |    |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 30. | Raspodjela posmičnog naprezanja $\tau_{xz}$ (lijevo) i aproksimirana raspodjela (desno) [13] .....                                                                        | 29 |
| Slika 31. | Kutna deformacija jezgre [12] .....                                                                                                                                       | 29 |
| Slika 32. | Model <i>sandwich</i> podnice .....                                                                                                                                       | 30 |
| Slika 33. | Dimenzije saća jezgre [13] .....                                                                                                                                          | 30 |
| Slika 34. | <i>Hookeov</i> dijagram tlačnog opterećenja <i>Nomexa</i> [14] .....                                                                                                      | 31 |
| Slika 35. | Orijentacija vanjskog sloja od $0^\circ$ .....                                                                                                                            | 32 |
| Slika 36. | Sklop konstrukcije za simulaciju vertikalnog udara .....                                                                                                                  | 32 |
| Slika 37. | Određivanje smjera normale kontinuiranih ljuskastih elemenata [9].....                                                                                                    | 34 |
| Slika 38. | Ilustracija rasporeda sjedala posade [2].....                                                                                                                             | 34 |
| Slika 39. | Model poda helikoptera sa sjedalima .....                                                                                                                                 | 35 |
| Slika 40. | Prikaz opterećenja sjedala i mreže konačnih elemenata.....                                                                                                                | 35 |
| Slika 41. | Nomenklatura kostura čovjeka [16] .....                                                                                                                                   | 36 |
| Slika 42. | Poboljšanje konstrukcije sjedala helikoptera na udar [16] .....                                                                                                           | 37 |
| Slika 43. | Monolitni kompozit s različitom orijentacijom slojeva [13] .....                                                                                                          | 38 |
| Slika 44. | Monolitna podnica s ostatkom konstrukcije poda helikoptera .....                                                                                                          | 39 |
| Slika 45. | Dijagram pomak-vrijeme.....                                                                                                                                               | 41 |
| Slika 46. | Usporedba deformiranog oblika i raspodjela naprezanja po <i>Von Misesu</i> na kraju numeričke analize i stvarnog prikaza spoja okvira V0 i STN1080F prema [4] [MPa] ..... | 42 |
| Slika 47. | Usporedba deformiranog oblika i raspodjela naprezanja po <i>Von Misesu</i> okvira V0 u stvarnom prikazu prema [4] i na kraju numeričke simulacije [MPa].....              | 42 |
| Slika 48. | Koncentracija naprezanja zakovičnog spoja.....                                                                                                                            | 43 |
| Slika 49. | Usporedba raspodjele naprezanja po <i>Von Misesu</i> okvira STN450F jednodijelnog aluminijskog (gore) te spojenog zakovicama (dolje) na kraju simulacije [MPa] ..         | 43 |
| Slika 50. | Raspodjela naprezanja po <i>Von Misesu</i> jednodijelne konstrukcije (a) i spojene zakovicama (b) u četiri vremenska perioda [MPa] .....                                  | 44 |
| Slika 51. | Usporedba ekvivalentnih plastičnih deformacija između jednodijelne aluminijske konstrukcije (a) i konstrukcije spojene zakovicama (b).....                                | 45 |
| Slika 52. | Usporedba promjene unutarnje energije i energije plastične disipacije tokom vremena simulacije.....                                                                       | 46 |
| Slika 53. | Usporedba promjene ukupne i kinetičke energije tokom vremena simulacije .....                                                                                             | 46 |
| Slika 54. | Usporedba akceleracije tokom vremena simulacije na krutoj ploči.....                                                                                                      | 47 |

|           |                                                                                                                                                             |    |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 55. | Usporedba brzine tokom vremena simulacije na krutoj ploči .....                                                                                             | 47 |
| Slika 56. | Raspodjela naprezanja po <i>Von Misesu sandwich</i> podnice opterećene krutom pločom na kraju simulacije [MPa].....                                         | 48 |
| Slika 57. | Plastična deformacija jezgre od <i>Nomexa</i> opterećena krutom pločom.....                                                                                 | 48 |
| Slika 58. | Položaj mjerenja rezultata za brzinu, akceleraciju i pomak u analizi na sjedalima .....                                                                     | 49 |
| Slika 59. | Dijagram pomak – vrijeme za kompozitne podnice.....                                                                                                         | 50 |
| Slika 60. | Usporedba vertikalne komponente brzine monolitne i <i>sandwich</i> podnice tokom vremena simulacije na sjedalu 2 .....                                      | 50 |
| Slika 61. | Usporedba vertikalne komponente akceleracije monolitne i <i>sandwich</i> podnice tokom vremena simulacije na sjedalu .....                                  | 51 |
| Slika 62. | Dijagram unutarnje energije modela s monolitnom i <i>sandwich</i> podnicom.....                                                                             | 51 |
| Slika 63. | Dijagram kinetičke i ukupne energije modela s monolitnom i <i>sandwich</i> podnicom .....                                                                   | 52 |
| Slika 64. | Raspodjela naprezanja po <i>Von Misesu</i> prvog sloja monolitne (a i b) i <i>sandwich</i> (c) podnice na kraju simulacije (30 ms) [MPa].....               | 52 |
| Slika 65. | Raspodjela <i>Hashinovog</i> kriterija tlačnog popuštanja vlakna.....                                                                                       | 53 |
| Slika 66. | <i>Hashinov</i> kriterij tlačnog popuštanja vlakna po debljini presjeka slojeva .....                                                                       | 53 |
| Slika 67. | Raspodjela <i>Hashinovog</i> kriterija vlačnog popuštanja matrice.....                                                                                      | 54 |
| Slika 68. | Raspodjela <i>Hashinovog</i> kriterija posmičnog popuštanja .....                                                                                           | 55 |
| Slika 69. | Dijagram pomaka <i>sandwich</i> podnica različitih debljina jezgre u vremenu.....                                                                           | 55 |
| Slika 70. | Brzina <i>sandwich</i> podnica različitih debljina jezgre .....                                                                                             | 56 |
| Slika 71. | Akceleracije <i>sandwich</i> podnica različitih debljina jezgre .....                                                                                       | 56 |
| Slika 72. | Raspodjela naprezanja po <i>Von Misesu</i> jezgre debljine 8(a), 6 (b) i 10(c) mm u trenutku udara i na kraju simulacije [MPa] .....                        | 57 |
| Slika 73. | Usporedba ekvivalentne plastične deformacije debljine jezgre 8(a), 6 (b) i 10(c) mm .....                                                                   | 58 |
| Slika 74. | Raspodjela <i>Hashinovog</i> kriterija vlačnog popuštanja matrice za donji vanjski sloj <i>sandwich</i> podnica debljine jezgre 6(b), 8 (a) i 10(c) mm..... | 58 |
| Slika 75. | Dijagram energije plastične disipacije <i>sandwich</i> podnica različitih debljina jezgre .....                                                             | 59 |
| Slika 76. | Kinetička i ukupna energija <i>sandwich</i> podnica različitih debljina jezgre .....                                                                        | 59 |

---

**POPIS TABLICA**

|                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablica 1. Tehničke karakteristike <i>Westland WG30</i> helikoptera [2]..... | 5  |
| Tablica 2. Dimenzije komponenti korištenih u konstrukciji poda [4].....      | 12 |
| Tablica 3. Svojstva plastičnog ponašanja aluminija Al-2014 [8].....          | 16 |
| Tablica 4. Mehanička svojstva GFRP materijala vanjskih slojeva [13].....     | 31 |
| Tablica 5. Parametri čvrstoće GFRP materijala vanjskih slojeva [13].....     | 31 |
| Tablica 6. Mehanička svojstva <i>Nomexa</i> [14] .....                       | 31 |
| Tablica 7. Parametri simulacija.....                                         | 40 |
| Tablica 8. Parametri simulacija podnice.....                                 | 49 |

---

**POPIS OZNAKA**

| Oznaka               | Jedinica | Opis                                                                     |
|----------------------|----------|--------------------------------------------------------------------------|
| <b>A</b>             | N/mm     | Matrica istezne krutosti                                                 |
| <b>B</b>             | N        | Matrica spregnute krutosti                                               |
| <b>C<sub>d</sub></b> | MPa      | Matrica elastičnosti                                                     |
| <b>D</b>             | mm       | Promjer zakovice                                                         |
| <b>D</b>             | Nmm      | Matrica savojne krutosti                                                 |
| $d_f$                | -        | Parametar oštećenja vlakna                                               |
| $d_m$                | -        | Parametar oštećenja matrice                                              |
| $d_s$                | -        | Parametar posmičnog oštećenja                                            |
| <b>E</b>             | MPa      | Youngov modul                                                            |
| $E_1$                | MPa      | Youngov modul u smjeru vlakna                                            |
| $E_2$                | MPa      | Youngov modul u smjeru okomitom na vlakna                                |
| <b>G</b>             | mm       | Debljina spoja kod zakovica                                              |
| $G^c$                | N/mm     | Energija utrošena na popuštanje                                          |
| $G_{fc}^c$           | N/mm     | Vrijednost energije utrošene na tlačno popuštanje vlakana                |
| $G_{ft}^c$           | N/mm     | Vrijednost energije utrošene na vlačno popuštanje vlakana                |
| $G_{mc}^c$           | N/mm     | Vrijednost energije utrošene na tlačno popuštanje matrice                |
| $G_{mt}^c$           | N/mm     | Vrijednost energije utrošene na vlačno popuštanje matrice                |
| <b>H</b>             | N/mm     | Matrica posmične krutosti                                                |
| <b>k</b>             | mm       | Korak zakovica                                                           |
| $L^c$                | mm       | Karakteristična duljina elementa                                         |
| <b>M</b>             | -        | Operator oštećenja                                                       |
| $M_i, i = x, y$      | N        | Unutarnji moment                                                         |
| $N_i, i = x, y$      | N/mm     | Unutarnja uzdužna sila                                                   |
| $Q, i = x, y$        | N/mm     | Unutarnja poprečna sila                                                  |
| $\bar{Q}$            | MPa      | Transformirana reducirana matrica elastičnosti                           |
| <b>u</b>             | mm       | Pomaci u x smjeru                                                        |
| <b>v</b>             | mm       | Pomaci u y smjeru                                                        |
| $\alpha$             | -        | Koeficijent doprinosa posmičnog naprezanja pri vlačnom popuštanju vlakna |
| $\delta_{eq}^0$      | mm       | Ekvivalentni pomak pri kojemu nastaje oštećenje                          |

|                                    |                   |                                                   |
|------------------------------------|-------------------|---------------------------------------------------|
| $\delta_{eq}^f$                    | mm                | Ekvivalentni pomak potpunog popuštanja sloja      |
| $\varepsilon_i, i$<br>$= x, y, z$  | -                 | Duljinska deformacija                             |
| $\kappa_{i,ij}, i, j$<br>$= x, y$  | 1/mm              | Zakrivljenost                                     |
| $\nu$                              | -                 | Poissonov koeficijent                             |
| $\rho$                             | t/mm <sup>3</sup> | Gustoća                                           |
| $\chi_{ij}, i, j$<br>$= x, y, z$   | rad               | Zakreti normala                                   |
| $X^T$                              | MPa               | Vlačna čvrstoća u smjeru vlakna                   |
| $X^C$                              | MPa               | Tlačna čvrstoća u smjeru vlakna                   |
| $\gamma_{ij}, i, j$<br>$= x, y, z$ | -                 | Kutna deformacija                                 |
| $Y^T$                              | MPa               | Vlačna čvrstoća u smjeru okomitom na smjer vlakna |
| $Y^C$                              | MPa               | Tlačna čvrstoća u smjeru okomitom na smjer vlakna |
| $S^L$                              | MPa               | Uzdužna smična čvrstoća                           |
| $S^T$                              | MPa               | Poprečna smična čvrstoća                          |
| $\hat{\sigma}$                     | MPa               | Efektivni tenzor naprezanja                       |

---

## SAŽETAK

U ovome radu biti će riječ o numeričkoj analizi udara konstrukcije poda helikoptera u tlo u programskom paketu *Abaqus/Explicit* s ciljem određivanja opterećenja kojima je u tom slučaju izložena posada.

Modeliran je jednodijelni aluminijski model koji je validiran podacima iz literature gdje je eksperimentalno ispitan dio konstrukcije poda helikoptera *Westland WG30* u kojem je smještena posada.

Zatim su kritični dijelovi konstrukcije modelirani detaljno, zakovičnim spojem, te se na tom modelu također vrši validacija.

U sljedećem poglavlju vrši se izrada numeričkog modela kompozitne podnice helikoptera na dva načina – kao monolitnu i kao *sandwich* konstrukciju uzimajući u obzir svojstva materijala koji se koriste u tu svrhu u realnim konstrukcijama.

Podnica je opterećena prvo krutom pločom kako bi simulacija pratila eksperiment, zatim konstrukcijom sjedala i masom posade. Analiza konstrukcijom sjedala vršena je na dvije monolitne podnice različitih orijentacija te *sandwich* podnici helikoptera koje su međusobno uspoređene kako bi se odredio utjecaj izvedbe podnice na opterećenja posade helikoptera.

Na kraju se proučava utjecaj debljine jezgre *sandwich* kompozitne podnice helikoptera.

Ključne riječi: konstrukcija poda helikoptera, kompozitna podnica, *sandwich* konstrukcije, mogućnost preživljenja.

## **SUMMARY**

The aim of this study is to perform a numerical analysis of the impact of a helicopter floor structure on the ground in the Abaqus/Explicit software package to determine the loads to which the crew is exposed.

A one-piece aluminum model has been modeled that has been validated using experimental data from the available literature. The part of the floor structure containing the crew of the Westland WG30 helicopter has been tested in this experiment.

Then, the critical parts of the structure are modeled in detail, with a rivet joint, and validation is also performed on that model. In the next section, the numerical model of a composite helicopter floor is made in two ways - as a monolithic and as a sandwich structure, considering the properties of the materials used for this purpose in real structures.

The floor was first loaded with a rigid plate for the simulation to follow the experiment, then with seat structure and crew mass. The seat structure analysis was performed on two monolithic floors of different ply layups and a helicopter sandwich floor. The results of these analyses were compared to each other to determine the impact of the floor design on helicopter crew loads.

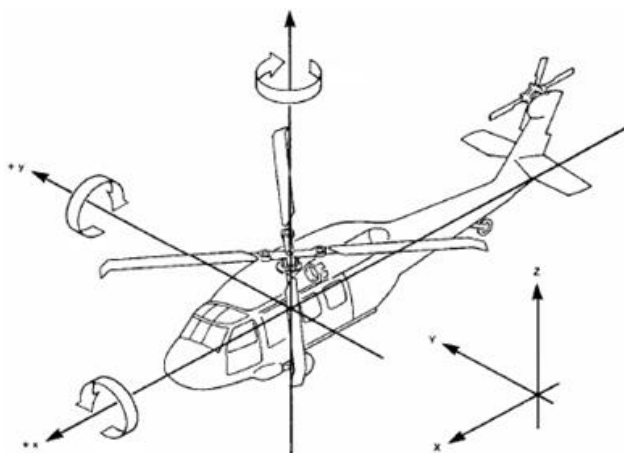
Finally, the effect of the core thickness of the sandwich composite helicopter floor is studied.

Key words: crashworthiness, sandwich structures, composite floor, helicopter floor design.

## 1. Uvod

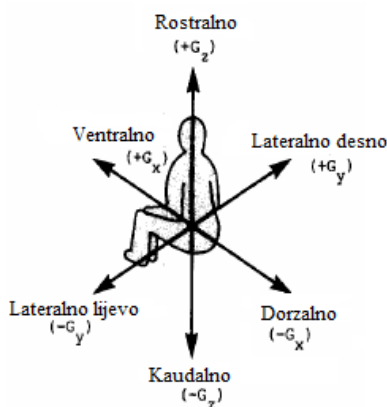
Nesreće kod letjelica i drugih motornih vozila nastavit će se dešavati usprkos svim ljudskim pokušajima da ih spriječe. Međutim, ozbiljne ozljede i smrt nisu neizbježne posljedice takvih nesreća. Utvrđeno je da je prosječno 85 posto svih avionskih i helikopterskih nesreća potencijalno preživljivo bez ozbiljnih ozljeda putnika [1].

Reagiranjem tijela na silu nastaju ozljede u zrakoplovnim nesrećama. Na Slici 1 prikazane su koordinatne osi korištene pri opisu gibanja helikoptera.



**Slika 1. Koordinate helikoptera u letu [1]**

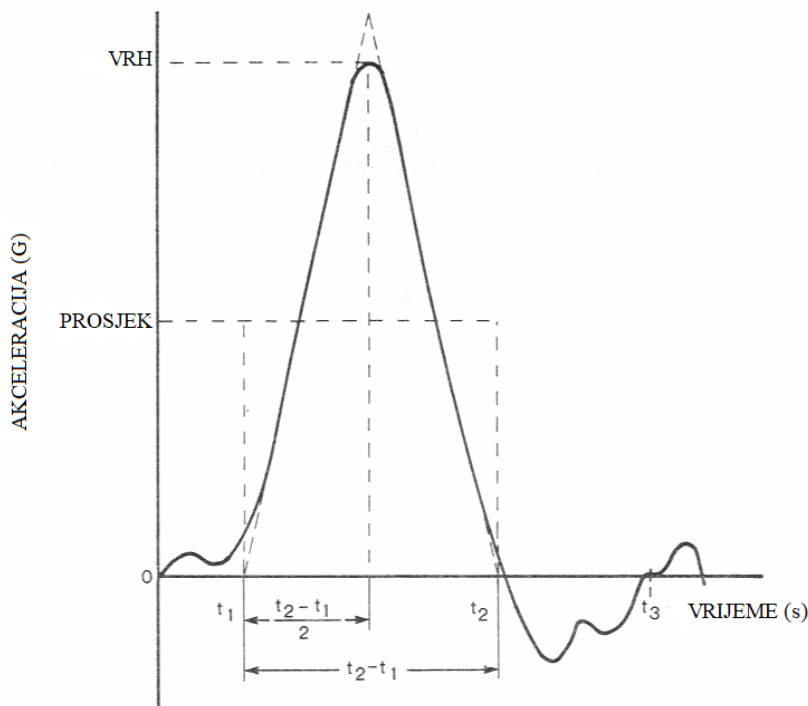
Slika 2 prikazuje uobičajeno upotrebljavan koordinatni sustav čovjeka u sjedećem položaju. Referenca pokreta očnih jabučica opisuje inercijsku reakciju tijela na nametnutu akceleraciju, koja je suprotna smjerom i jednaka iznosom nametnutoj akceleraciji. Upravo ta reakcija tijela na nametnutu akceleraciju je uzrok većini ozljeda [1].



**Slika 2. Koordinatni sustav čovjeka u sjedećem položaju [1]**

Akceleracija može biti opisana u jedinicama  $G$  koje su omjer određene postignute akceleracije letjelica i gravitacije tj.  $G = a/g$  kako je prikazano i na Slici 2. Kao rezultat takvog razmatranja, sile udara proučavaju se kao višekratnici težine objekta na koji djeluje akceleracija.

Udarac ili sudar je često opisan pomoću krivulje prikazane na Slici 3 nazvanom impulsom udara.



**Slika 3. Krivulja "impulsa udara" [1]**

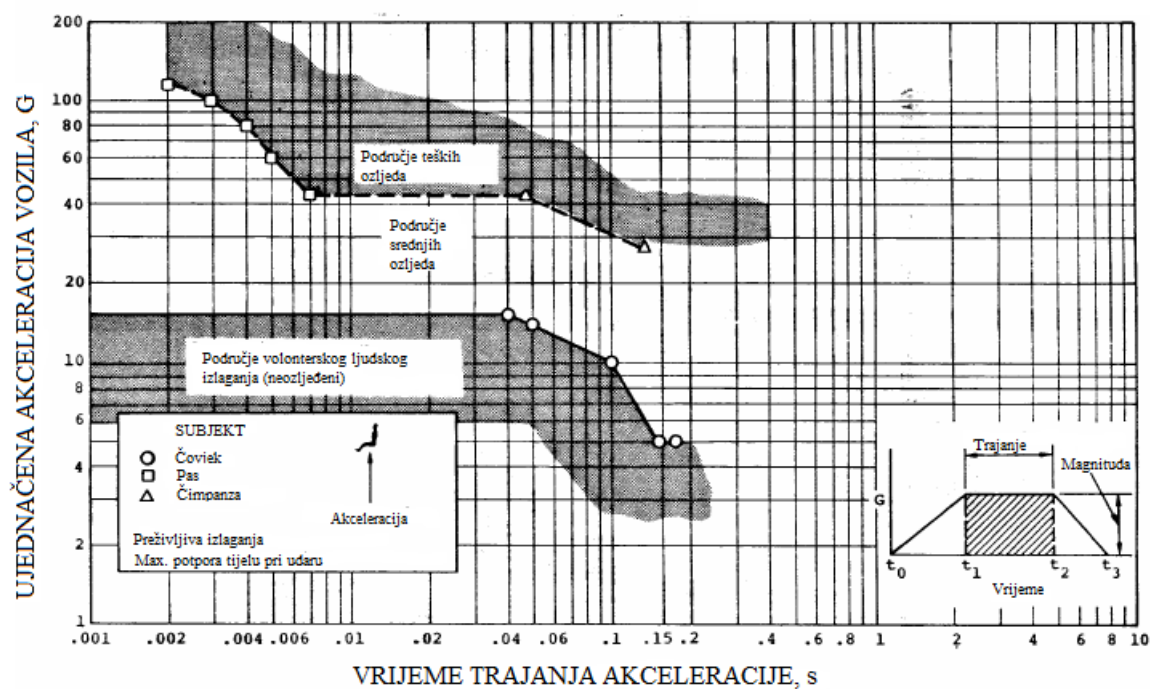
Impuls udara je dijagram akceleracije udara tokom vremena sudara. Iako krivulja može izgledati znatno drugačije za različite vrste sudara, za većinu avionskih i helikopterskih nesreća odgovara trokutasti oblik.

Ako se može procijeniti brzina vozila u trenutku sudara te zaustavni put, vrh akceleracije vozila može se lako izračunati koristeći krivulju impulsa udara preko jednadžbe:

$$G = \frac{v^2}{gs}, \quad (1)$$

gdje je  $v$  brzina promatranog tijela,  $s$  zaustavni put, a  $g$  gravitacija.

*Eiband* krivulje su krivulje ljudske tolerancije na opterećenje akceleracijom. Slika 4 prikazuje *Eiband* krivulje za akceleraciju u smjeru  $+G_z$ , analogno smjeru izbacivanja čovjeka iz sjedala pri naglom utjecaju akceleracije vertikalnog pada helikoptera. To je spoj jednoličnih akceleracija vozila prikazanih u donjem desnom kutu Slike 4 i trajanja akceleracija impulsa udara do 150 milisekundi [1].



**Slika 4. Eiband krivulja u +  $G_z$  smjeru [1]**

Dijagram ilustrira da individualni volonteri izdrže akceleracije do od prilike 18 G bez ikakvih ozljeda, a ozljede kralježnice se ne pojavljuju ispod akceleracije od 20, 25 G. Na ozljede velik utjecaj ima trajanje velikih iznosa akceleracija, dugi periodi pod visokom akceleracijom znatno su opasniji od kratkih impulsa te mogu imati značajne posljedice. Kao što je vidljivo na legendi dijagrama, izlaganja su moguća preživjeti uz suštinski idealizirana sjedala i sigurnosni sustav.

U ovome radu biti će prikazane numeričke analize udara u tlo različitih konstrukcija poda (jednodijelni model te model spoja zakovicama) te podnica (*sandwich* kompozitna i monolitna) helikoptera, na koje se direktno montiraju sjedala posade, u svrhu dobivanja kritičnih područja popuštanja konstrukcije kako bi se osigurala sigurnost posade helikoptera te smanjile ozljede i smrtnost pri udaru u tlo.

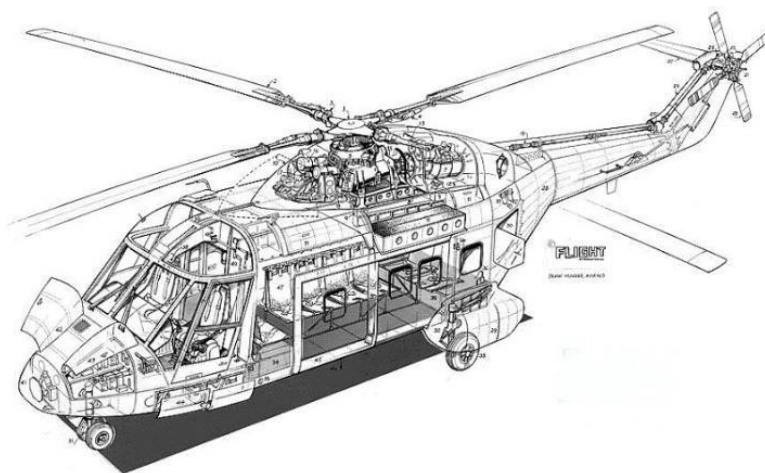
## 2. Westland WG30 helikopter

Westland 30 je dvomotorni helikopter srednje veličine proizveden od strane britanskog proizvođača Westland Helicopters. Westland 30 predstavlja razvoj helikoptera Westland Lynx s povećanom konstrukcijom i modificiranim rotorskim sustavom [2].

Proizvodnja WG30 počela je 70-ih godina 20. stoljeća te je korišten i u vojne svrhe. Kao vojni helikopter WG30 zadržao je transmisiju, konstrukciju lopatica rotora, te brojne sustave i instrumente kao njegov prethodnik Westland Lynx, izuzev trupa koji je posve nov i veći. U potpunosti je napravljen od legura aluminija dok je kompozitni materijal korišten kod konstrukcije repa helikoptera (*tail boom*). Veći promjer glavnog rotora odabran je u svrhu postizanja duljeg roka trajanja zbog njihove sporije brzine vrtnje.

Westland 30 originalno je bio namijenjen u vojne svrhe u taktičkom transportu i zračnoj hitnoj pomoći, ali se pokazao jednako prikladan za civilno tržište. U tom obliku helikopter sadrži opcionalne pomične stube ili klizna vrata, te može povesti do 22 putnika. Mogućnosti Westland-a 30 u nadmorskom letu su posebno zanimljive: s radnim radijusom od 250 km i 227 kg goriva može povesti 9 putnika te vratiti 13. U vojnoj varijanti, isti helikopter može povesti 14 opremljenih četa ili 17 bez opreme, ili 6 nosila plus medicinsko osoblje [2].

Prototip helikoptera Westland 30 prvi puta je poletio 10. travnja 1979. Tokom godina znatno su napredovali u pogledu performansi mase konstrukcije i korisne nosivosti u vrućim/visokim područjima, te razvoju rotorskog sustava s pet lopatica koji se koristio na novim verzijama proizvoda. Proizvodnja je završila 1987. s ukupno 38 proizvedenih proizvoda toga tipa [2].



Slika 5. Westland WG30 [3]

Tablica 1 prikazuje tehničke karakteristike Westland WG30 helikoptera.

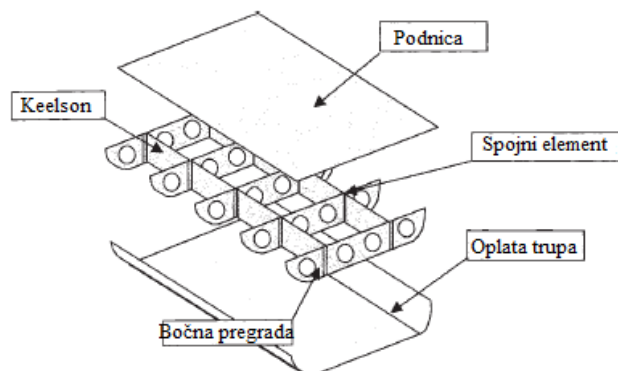
**Tablica 1. Tehničke karakteristike Westland WG30 helikoptera [2]**

|                           |                         |
|---------------------------|-------------------------|
| Posada                    | 2                       |
| Putnici                   | 22                      |
| Pogon                     | 2 turbo vratilna motora |
| Model motora              | Rolls-Royce Gem 60-3    |
| Snaga motora (svaki)      | 940 kW                  |
| Brzina                    | 241 km/h                |
| Max. visina               | 3810 m                  |
| Domet                     | 350 km                  |
| Masa konstrukcije         | 3120 kg                 |
| Max. masa pri polijetanju | 5818 kg                 |
| Promjer glavnog rotora    | 13,3 m                  |
| Promjer repnog rotora     | 2,44 m                  |
| Površina diska rotora     | 139,1 m <sup>2</sup>    |
| Duljina                   | 15,91 m                 |
| Visina                    | 4,74 m                  |

### 2.1. Osnovni principi otpornosti helikoptera na udar [6]

Helikopteri su konstruirani i proizvedeni kako bi omogućili sigurno letenje. Unatoč tome, nesreće se događaju kao posljedica tehničkih pogrešaka i/ili ljudske greške. Glavni ciljevi znanstvenih istraživanja vezanih za otpornost helikoptera na udar (eng. *crashworthiness*) orijentirani su prema konstruiranju sustava goriva, konstrukcija sjedala, te ograničenja kako bi se spriječile moguće nesreće. Točnije, kod helikopterskih udarnih nesreća s velikim utjecajem vertikalne komponente brzine pri padu, opterećenje pri udaru mora se moći apsorbirati preko kontrolirane deformacije konstrukcije, uključujući opremu za slijetanje, pod i sustav sjedenja. Kada se uzima u obzir sposobnost apsorpcije kinetičke energije, pod je jedna od najvažnijih komponenti konstrukcije. Posljedično, mora biti konstruiran na način da ograniči sile koje nastaju pri smanjenju brzine deformacijom konstrukcije i osigura integritet konstrukcije pod kabina nakon udara.

Slika 6 predstavlja tipičnu konstrukciju poda koja se sastoji od uzdužnih *keelsona* (ojačana podna greda), bočnih pregrada i spojnica, prekrivenih s donje strane oplatom trupa, a s gornje podnicom.



**Slika 6. Tipična konstrukcija poda [6]**

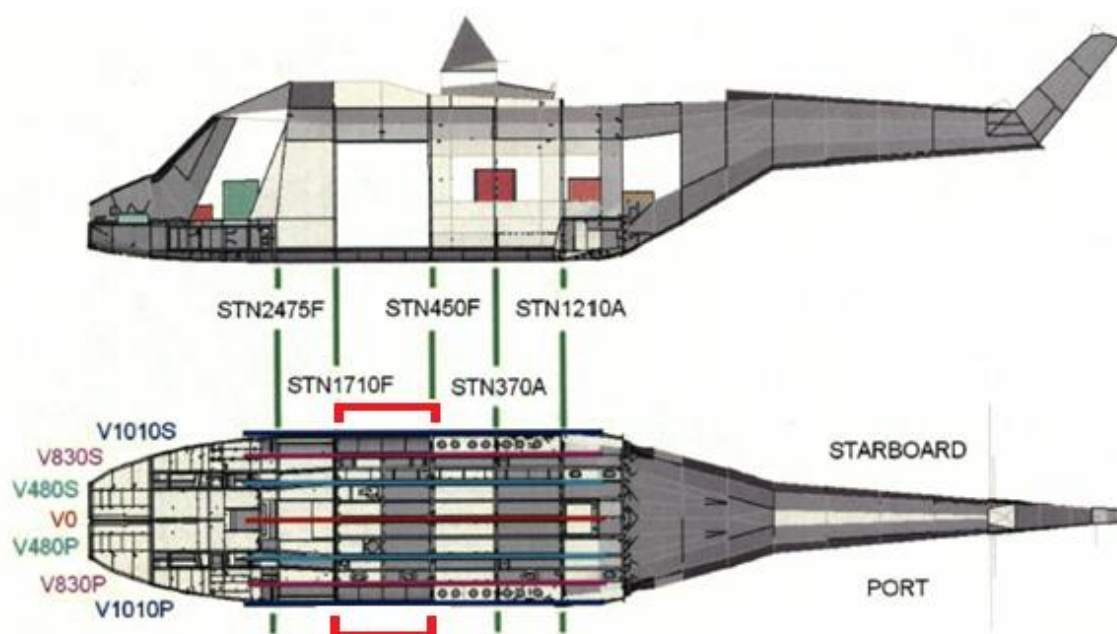
Nema konkretnog savjeta kako povećati otpornost helikoptera na udar. Jedan od načina može biti optimizirati zasebno komponente poda s obzirom na povećanje apsorpcije energije i kapaciteta nosivosti. To se odnosi na oblik svakog konstrukcijskog elementa, na mjestu spoja svakog dijela, pogotovo kod zakovičnog spoja, te topologiji cijele konstrukcije sklopa.

## **2.2. Konstrukcija poda helikoptera Westland WG30**

Komponenta konstrukcije poda glavnog putničkog dijela helikoptera *Westland WG30* izrađena je od legure aluminija *Al2014*. Položaj komponente poda u odnosu na ostatak konstrukcije helikoptera može se vidjeti na Slici 7 [4].

Tipična konstrukcija poda sastoji se od "V" okvira koji se protežu uzduž longitudinalne osi helikoptera, proizvedeni od metalnih limova ojačanih jednoliko razmaknutim ukrutama L profila. Donji dio ramenjača ojačan je ukrutama Z profila koje se protežu uzduž njihove duljine, te su također direktno spojene na oplatu poda.

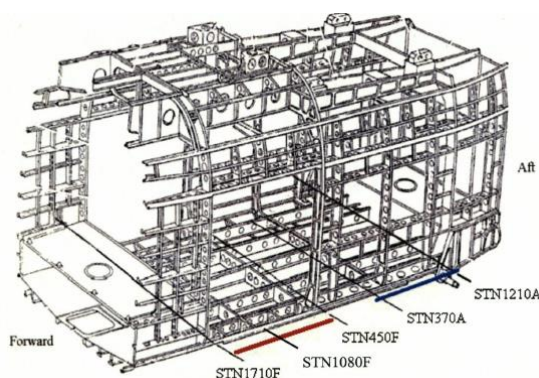
"STN" okviri orijentirani u transverzalnom smjeru su također proizvedeni od metalnih limova te su kraći u odnosu na uzdužne elemente konstrukcije. Pričvršćeni su za longitudinalne okvire zakovicama preko ukruta C oblika kako bi formirali individualne odjeljke, zajedno s ukrutama L profila koje osiguravaju poprečnu ugradnju za pod putnika pomoću konusnih vijaka. "STN" okviri sadrže središnji izrez za ukrute Z presjeka koje osiguravaju krutost konstrukcije donjem limu.



**Slika 7. Položaj modelirane komponente poda u odnosu na ostatak konstrukcije [5]**

Zakrivljeni krajevi oplata zakovično su spojeni izravno na glavni uzdužni završni okvir koji prenosi direktnu putanju opterećenja glavnih sklopova motora i sklopova reduktora. Podnica putničkog dijela helikoptera izrađena je od kompozitnog materijala naziva *Fibrelam*, koja se sastoji od jedno usmjerenih staklenih vlakana vezanih za jezgru saća/aramida, te se spaja na podnu podlogu pomoću konusnih vijaka. Vanjski dio konstrukcije također se proizvodi od metalnih limova i zakovično je spojen na sve uzdužne i poprečne okvire [4].

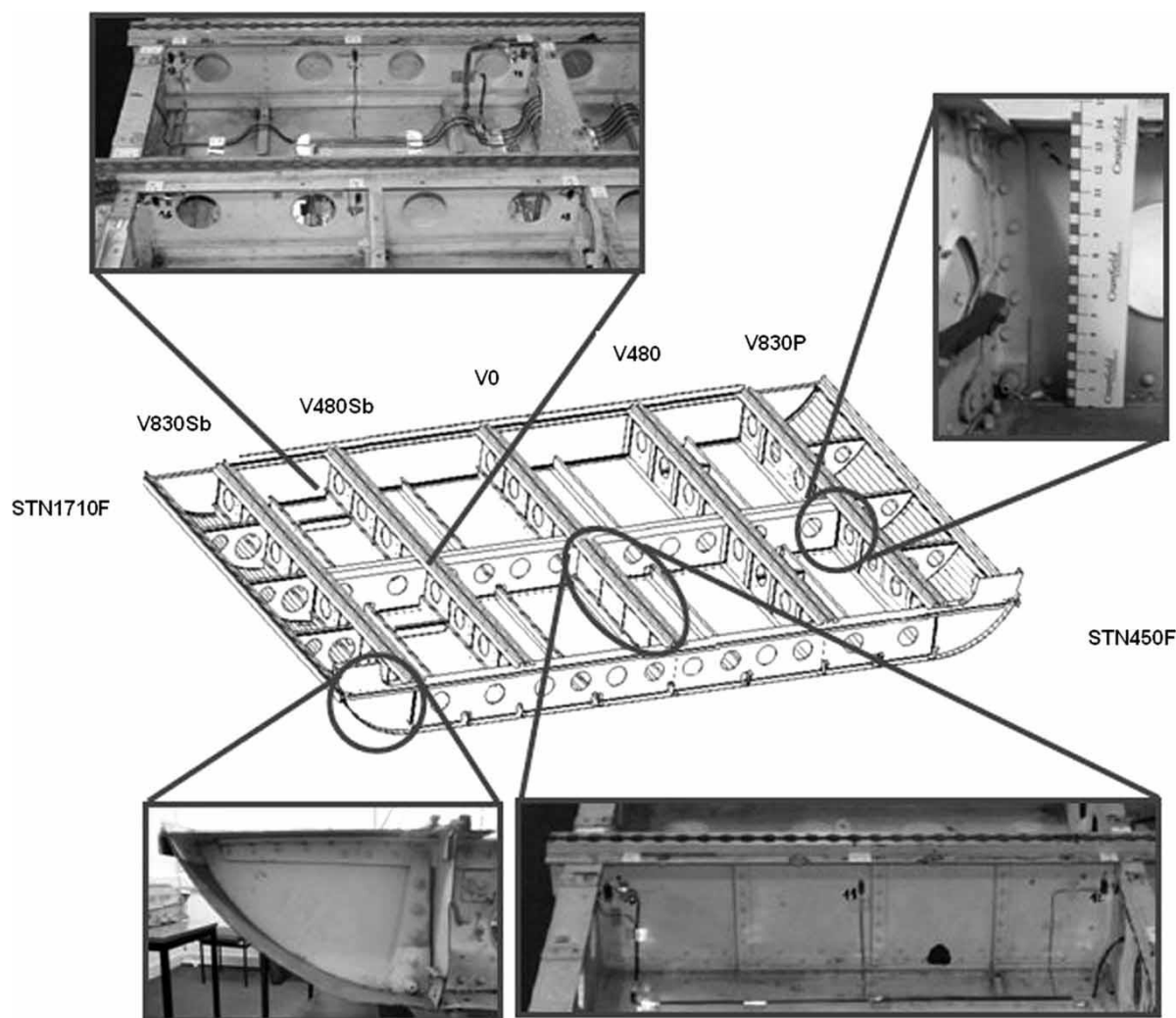
Slika 8 prikazuje segment poda koji se proteže između okvira "STN1710F" i "STN450F" u odnosu na rešetkastu konstrukciju trupa helikoptera.



**Slika 8. Lokacija komponente poda u odnosu na ostatak konstrukcije putničkog dijela trupa helikoptera [4]**

Komponenta je 2250 mm široka, 1260 mm dugačka, 165 mm visoka i ima masu od 44 kg. Taj je odjeljak izabran kako bi se istražila šteta koja nastaje duž dijela poda gdje su glavni poprečni okviri direktno spojeni, zajedno s uključivanjem utjecaja barem jednog drugog glavnog poprečnog okvira ("STN1080F") [4].

Detaljiziran shematski prikaz komponente popraćen slikama iz eksperimenta nalazi se na Slici 9.



Slika 9. Detaljan shematski prikaz odjeljka popraćen slikama konstrukcije poda [4]

### 2.3. Eksperimentalno ispitivanje [4]

Eksperimentalno ispitivanje provedeno je u sklopu *CAST* projekta od strane *ECD-a* (*EuroCopter-Deutschland*, kasnije *Airbus Helicopters*). Postava eksperimenta sastoji se od čelične platforme vođene vodilicama s kolicima na koja je kruto spojen testni primjerak

(segment poda). Slika 10 predstavlja fotografiju ove konfiguracije, kojom je u eksperimentu dobiven skoro okomit utjecaj brzine od 8 m/s postignut kroz slobodan pad s 3,26 metara.



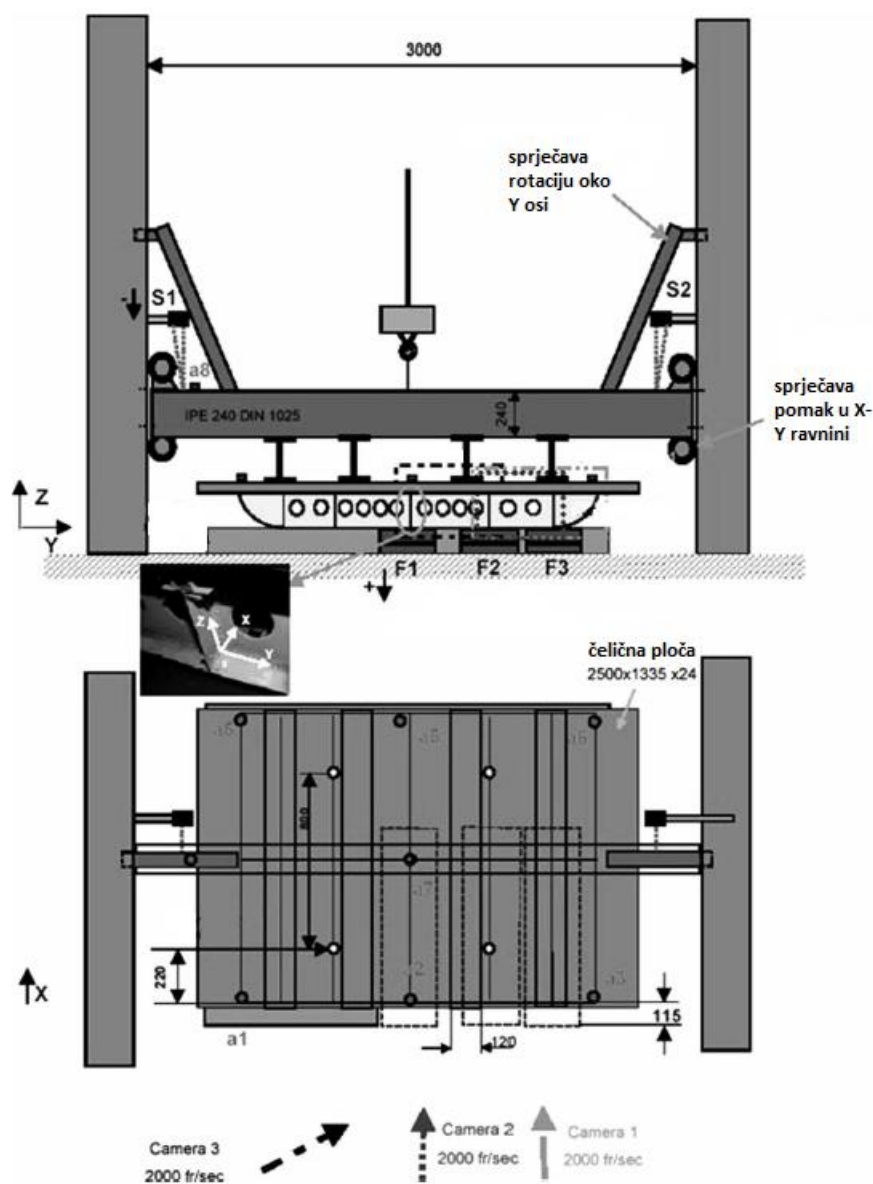
**Slika 10. Postava eksperimenta [4]**

Cilj eksperimenta bio je osigurati sljedeće informacije:

- globalnu kinematiku donjeg dijela poda pomoću akcelometra,
- analize deformacije pomoću fotogrametrije i laserskih senzora pomaka, to omogućuje određivanje apsolutne deformacije i relativnog pomaka određene točke, kao i neovisnu provjeru brzine udara,
- fotografije deformiranog oblika nakon ispitivanja,
- podatke o mjerenim naprezanjima na raznim mjestima.

Tijekom provedbe eksperimenta u [4] je iz komunikacije s proizvođačem helikoptera odlučeno da će okviri "STN1710F" i "450F" podržavati ukupnu masu od 723 kg i da bi rešetkasta konstrukcija sjedala između njih trebala izdržati 226 kg. Umjesto distribuiranja mase na taj način donesena je odluka da će se duž cijele površine segmenta poda spojiti čelična ploča koja će predstavljati ostatak mase helikoptera u svrhu lakšeg postavljanja eksperimenta. Ploča je zajedno s početnim postavkama eksperimenta (kolica sa segmentom poda) imala masu od 1005 kg.

Slika 11 predstavlja shematski prikaz eksperimentalnog postava s određenim mjerama iskazanima u milimetrima.

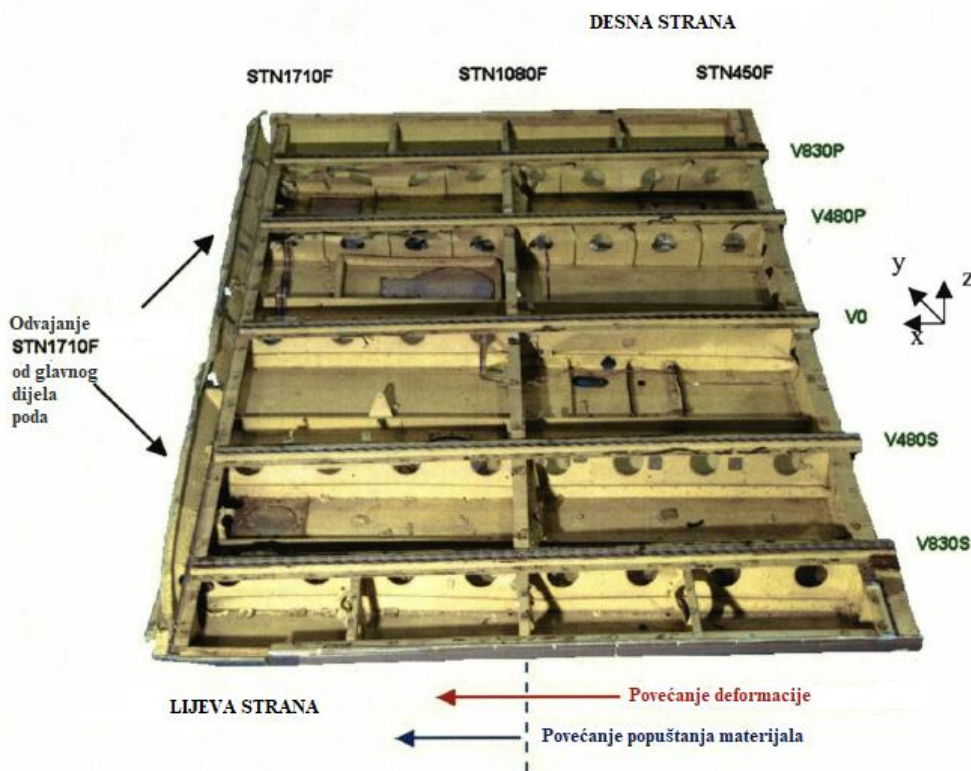


Slika 11. Shematski prikaz eksperimenta, dimenzije su u mm [4]

#### 2.4. Analiza eksperimenta [4]

Zbog brojnosti dostupnih informacija vezanih za eksperiment omogućen je osnovni pregled reakcije podnice na takvu vrstu podražaja te detaljne analize okvira po okvir. Radi lakše orijentacije, konstrukcija je podijeljena na pojedine zone u kojima postoji lokalni koordinatni sustav, koji je centriran na spoju elemenata "V0" i "STN450F", a pozitivan u smjeru lijeve strane i prednjeg dijela kao što je prikazano na Slici 12. Sva mjerenja su provedena u odnosu

na ovaj koordinatni sustav, koji je omogućio zabilježbu apsolutne relativne deformacije pojedinih plastičnih zglobova; visine zgnječenih okvira, kao i pomicanje ukruta Z profila.



**Slika 12. Globalni pogled segmenta poda nakon eksperimenta [5]**

Unatoč razdvajanju "STN1710F", oplata ostaje netaknuta, s deformacijama uočenim u svim uzdužnim i poprečnim konstrukcijski elementima poda, što je u skladu s prirodom distribuiranog opterećenja narinutog na presjeku poda, zbog prisutnosti čelične ploče. Iznos deformacije okvira jako ovisi o njegovoj konstrukciji.

Jedna od glavnih značajki koje treba napomenuti je činjenica da deformacija nije jednolično raspodijeljena, veće deformacije su postignute prema prednjoj polovici sastavnog dijela između oplata "1710F" i "1080F". Ova asimetrija uzrokovana je razdvajanjem "STN1710F" od ostatka poda. Gubitak u lokaliziranoj čvrstoći smanjuje nosivost u tim dijelovima konstrukcije, što doprinosi većim deformacijama u obliku povećanog popuštanja materijala i većim vrijednostima plastičnih deformacija.

Na mjestu spoja okvira vrata smještenog sprijeda i straga odjeljka "V830" dolazi do malo deformacija. Ovaj odjeljak je ojačan duž obje strane ukrutama.

### 3. Numerička analiza

Metoda konačnih elemenata korištena je u ovom radu kako bi se računalno simulirao udar konstrukcije helikoptera u tlo koristeći programski paket *Abaqus/Explicit*.

*Abaqus/Standard* rješava sustav jednadžbi implicitno kod svakog rješenja "inkrementa". Suprotno tome, *Abaqus/Explicit* daje rješenje korištenjem malog vremenskog perioda inkremenata bez rješavanja povezanog sustava jednadžbi na svakom koraku (ili čak formiranja globalne matrice krutosti). *Abaqus/Standard* koristi se kao program za analizu konačnih elemenata za statičke i kvazistatičke probleme, a *Abaqus/Explicit* za eksplicitnu dinamiku konačnih elemenata [9]. Zato je korišten i u ovom radu gdje je simulirana dinamička analiza pada helikoptera na tlo.

#### 3.1. Geometrija

Kako bi se provela numerička analiza metodom konačnih elemenata prvo je potrebno zadati geometriju preko CAD modela. CAD model napravljen je u programskom paketu *SolidWorks* koristeći se parametrima zadanim od strane proizvođača (*Westland Helicopters*) preuzetim iz članka [4]. Korištene dimenzije komponenti nalaze se u Tablici 2.

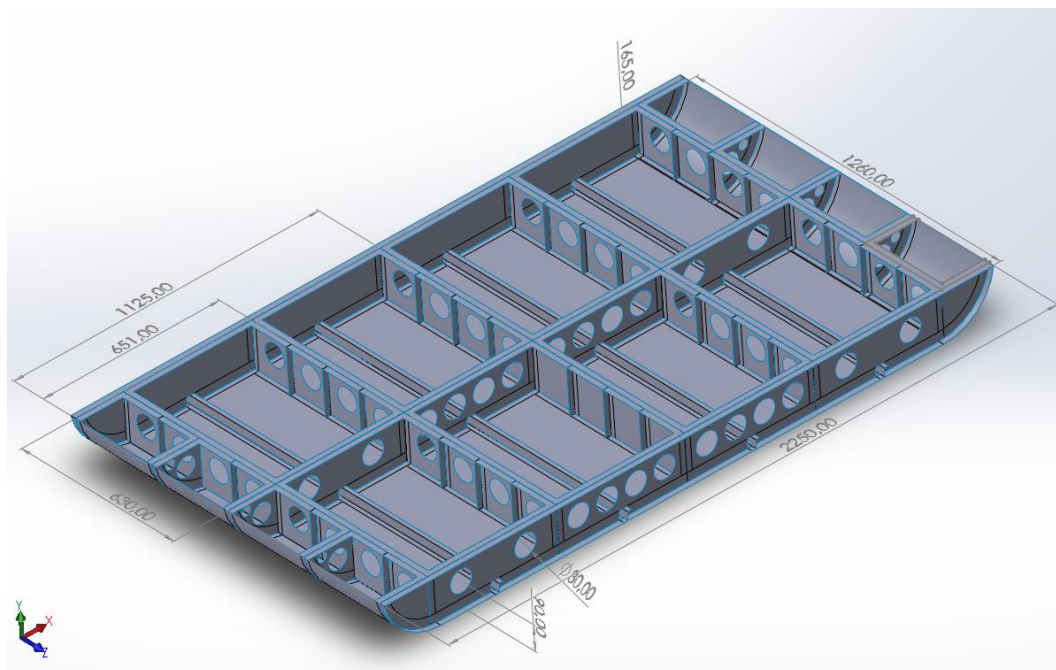
| Predmet        | Duljina<br>(mm) | Visina<br>(mm) | Debljina<br>(mm) | Količina | Materijal |
|----------------|-----------------|----------------|------------------|----------|-----------|
| V830           | 1292.0          | 143.0          | 1.2              | 2        | Al2014    |
| V480           | 630.0           | 143.0          | 1.2              | 4        | Al2014    |
| V0             | 627.0           | 143.0          | 1.2              | 2        | Al2014    |
| STN450F        | 1655.0          | 145.0          | 1.2              | 1        | Al2014    |
| STN450F        | 362.0           | 145.0          | 0.9              | 2        | Al2014    |
| STN1710F       | 2139.0          | 180.0          | 0.9              | 1        | Al2014    |
| z-ukrute       |                 |                |                  | 9        |           |
| struk          | 1300.0          | 31.0           | 0.9              | –        | Al2014    |
| donji pojas    | 1300.0          | 18.5           | 0.9              | –        | Al2014    |
| gornji pojas   | 1300.0          | 10.5           | 0.9              | –        | Al2014    |
| L - ukrute     |                 |                |                  | 26       |           |
| struk          | 20.0            | 14.0           | 0.9              | –        | Al2014    |
| pojas          | 16.0            | 14.0           | 0.9              | –        | Al2014    |
| Vanjska oplata | 1660.0          | 1272.0         | 0.7              | 1        | Al2014    |
| Putnički pod   | 1249.0          | 326.0          | 10.0             | 2        | Fibrelam  |
|                | 1249.0          | 456.0          | 10.0             | 2        | Fibrelam  |
|                | 1249.0          | 233.0          | 10.0             | 2        | Fibrelam  |

Tablica 2. Dimenzije komponenti korištenih u konstrukciji poda [4]

Model je napravljen uporabom dvodimenzionalne geometrije tj. površina što se inače i koristi u zrakoplovnoj industriji kako bi se mogla bolje prikazati tankostijena konstrukcija helikoptera. Za diskretizaciju koriste se ljuskasti konačni elementi čija se debljina zadaje izravno u programskom paketu za metodu konačnih elemenata (*Abaqus Explicit*).

Segment poda helikoptera detaljno je opisan u poglavlju 2.2 te CAD model direktno prati taj opis izuzev nosača na gornjoj plohi poda, C ukruta te brojnih električnih i ostalih elemenata koji tvore sklop poda helikoptera, a ne utječu značajno na odziv pri udaru konstrukcije u tlo.

Na Slici 13 prikazan je CAD model aluminijskog dijela poda helikoptera Westland WG30 dimenzija 2250 x 1260 x 165 milimetara.



**Slika 13. CAD model aluminijskog dijela poda helikoptera, dimenzije su u [mm]**

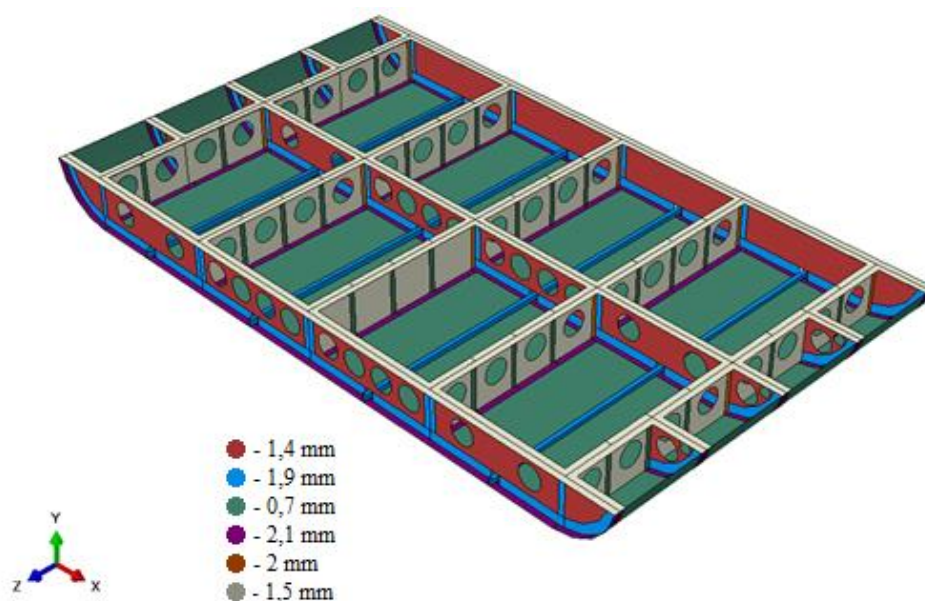
Model je izrađen od legure aluminija (Al2014) te ga čine uzdužni ("STN1710F", "STN1080F" i "STN450F") i poprečni okviri ("V830Sb", "V480Sb", "V0", "V480" i "V830P"), ukrute L profila, ukrute z profila, te oplata duž cijele vanjske strane poda. Većina okvira sadrži brojne prolaze za instalacije te provrte za redukciju mase. Također su detaljnije razrađena mjesta spojeva okvira te okvira i oplata.

Podnica koja spaja pod putničke kabine s pod konstrukcijom poda na Slici 13 nije prikazana. Model prati eksperimentalni postav ispitivanja opisanog u poglavlju 2.3, te stoga na aluminijski model dolazi čvrsto vezana čelična ploča opterećena kako bi predstavljala masu ostatka konstrukcije helikoptera.

Iz ovog modela izuzeti su spojevi sa zakovicama koji će biti prikazani u nastavku rada.

### 3.2. Numerički model

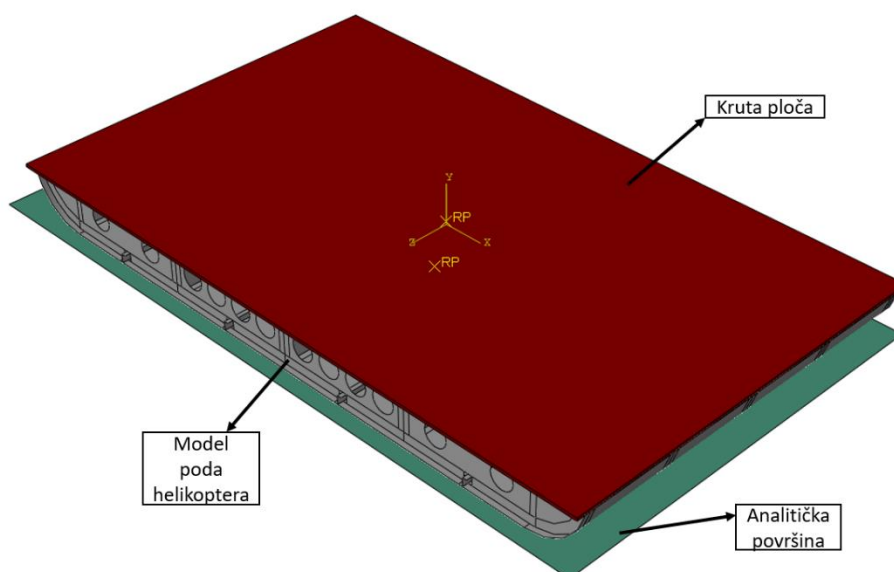
CAD model iz SolidWorks-a je prebačen u Abaqus/Explicit u step formatu. Različite debljine dodijeljene ljuskastim konačnim elementima su prikazane na Slici 14.



**Slika 14. Model poda s različito dodijeljenim debljinama**

Zbog veće stabilnosti konstrukcije području spojeva uzdužnih i poprečnih okvira dodijeljena je veća debljina (na Slici 14 označeno narančastom bojom). Također isto vrijedi za spojeve vanjske oplata i okvira (ljubičasta boja), uzdužnih okvira (plava) te spojeve s ukrutama (zelena). Uzdužni okviri označeni su crvenom bojom, a poprečni sivom.

Sklop numeričkog modela čine model poda helikoptera, kruta ploča koja predstavlja ostatak mase helikoptera te analitička kruta 2D površina koja predstavlja tlo. Sklop je prikazan na Slici 15.

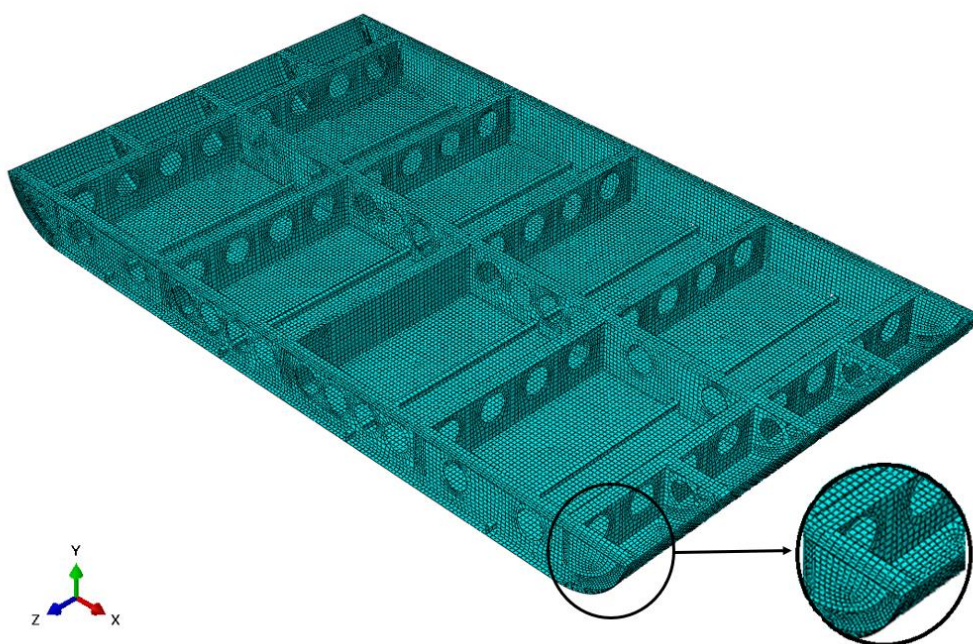


**Slika 15. Sklop numeričkog modela**

### 3.3. Mreža konačnih elemenata

Model poda helikoptera diskretiziran je ljuskastim konačnim elementima s reduciranom integracijom (strukturiranim kvadratnim S4R elementima). Kvadratni element sastoji se od četiri čvora u vrhovima četverokuta s po šest stupnjeva slobode u svakom čvoru. Stupnjevi slobode pomaci su u pravcu koordinatnih osi  $x$  i  $y$  i  $z$  te rotacija oko istih [9].

Nakon konvergencije rješenja, koja će biti prikazana kasnije u radu, za daljnju analizu odabran je model helikoptera diskretiziran s 46132 elemenata te 47420 čvora prikazan na Slici 16.



**Slika 16. Mreža konačnih elemenata modela poda helikoptera**

Na određenim dijelovima konstrukcije gdje je moguća pojava većih koncentracija naprezanja (npr. uvećani dio sa slike), odabrana je finija mreža radi što točnijeg određivanja stanja naprezanja u konstrukciji.

### 3.4. Materijalni model

Materijal korišten u svim komponentama modela segmenta poda helikoptera definiran je kao elastičan i linearno očvršćujući po dijelovima u plastičnom području. Svojstva plastičnog ponašanja materijala preuzeta su iz [8] gdje je vršena numerička simulacija prethodno opisanog eksperimenta te su navedene u Tablici 3.

**Tablica 3. Svojstva plastičnog ponašanja aluminija Al-2014 [8]**

| Efektivno plastično naprezanje [MPa] | Efektivna plastična deformacija [%] |
|--------------------------------------|-------------------------------------|
| 326,8                                | 0                                   |
| 366,5                                | 0,49                                |
| 429,6                                | 2,41                                |
| 462,5                                | 4,36                                |
| 495                                  | 7,31                                |
| 518,3                                | 10,28                               |
| 556,6                                | 17,23                               |

Ostala svojstva aluminija Al2014 korištena u numeričkoj analizi su: (Youngov modul)  $E = 72750$  MPa, (Poissonov koeficijent)  $\nu = 0,33$ , (gustoća)  $\rho = 2,7 \cdot 10^{-9}$  t/mm<sup>3</sup>.

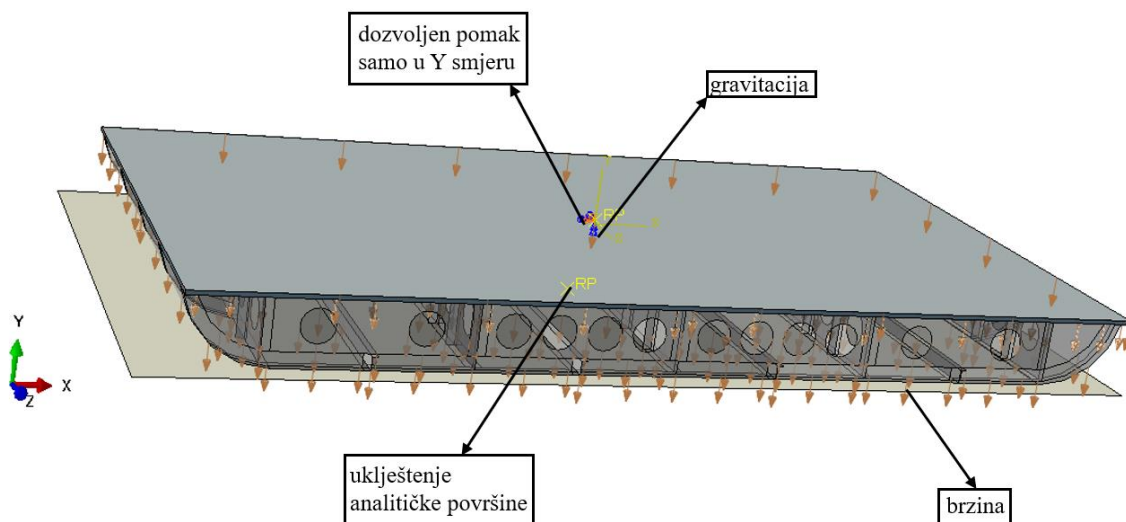
Konstitutivnom modelu materijala dodan je kriterij posmičnog popuštanja *shear failure*, u vidu ekvivalentne plastične deformacije pri 17%. Kriterij posmičnog popuštanja dodan je u .inp (*input*) datoteci. Prema tom kriteriju, kada sve materijalne točke (*section points*) u elementu dostignu plastičnu deformaciju od 17% element u mreži konačnih elemenata se briše. Na dalje mehaničkih svojstava tih elemenata više nema te ne utječu na analizu. Za ljuskaste elemente unaprijed je omogućeno brisanje elemenata ako sve materijalne točke postignu prethodno opisani uvjet popuštanja materijala [3].

### 3.5. Rubni uvjeti i opterećenje

Simulacija je vršena prema eksperimentalnom ispitivanju objašnjenom u poglavlju 2.3 te tako i prati početne uvjete eksperimenta. Prvo, na konstrukciju utječe gravitaciju koja se zadaje kao opterećenje, iznosa  $9,81 \text{ m/s}^2$ . Zatim se kao opterećenje zadaje početna brzina cijelog sustava izmjerena u [4] koja iznosi  $8 \text{ m/s}$  u vertikalnom smjeru. Kao rubni uvjeti onemogućuje se kretanje i zakret analitičke površine u svim smjerovima (uklještenje) jer ona predstavlja tlo te je ono postavljeno u referentnu točku analitičke površine. Krutoj ploči koja predstavlja dodatnu masu ostatka helikoptera je ista dodana preko *Point mass* naredbe u referentnu točku koja se nalazi na središtu površine ploče te iznosi  $961 \text{ kg}$ . Naknadno je definirana kao *Rigid body* kako bi se zanemarile deformacije ploče na kojoj u ovom radu nije fokus, te je spojena za model podatke vezom što omogućuje da oba modela zajedno padaju prema analitičkoj površini. Također joj je rubnim uvjetima omogućeno kretanje samo u y smjeru kako bi se simulirao vertikalni pad.

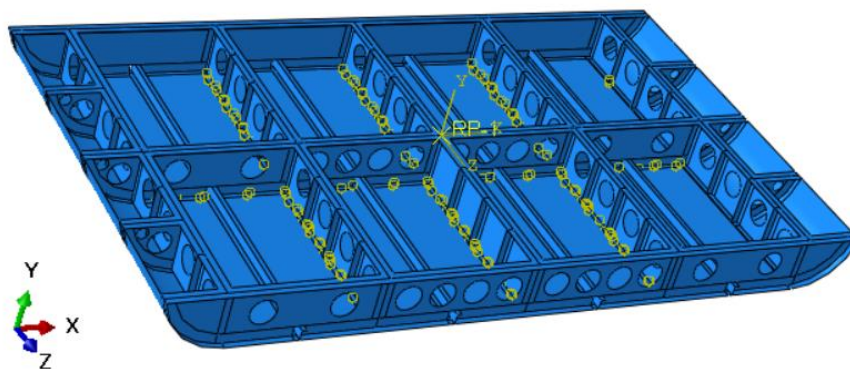
Analitička površina je udaljena od ostatka 5 mm te simulacija pada traje 35 ms što je dovoljno za procjenu oštećenja konstrukcije nakon udara. Udarac u pod i međusobni kontakt između članova numeričkog modela definiran je kao *General contact* uz utjecaj trenja faktora 0,1.

Slika 17 predstavlja prikaz sustava simulacije udara poda helikoptera u tlo sa zadanim opterećenjima i rubnim uvjetima.



**Slika 17. Rubni uvjeti i opterećenja poda helikoptera pri udaru u tlo**

Zbog problema s odvajanjem određenih okvira od oplata isti su povezani *tie* vezom kako bi se mogli prikazati realni rezultati. *Tie* veza prikazana je na Slici 18 žutim oznakama.



**Slika 18. Povezivanje okvira i oplata *tie* vezama**

### 3.6. Zakovični spoj

Najzastupljeniji postupak spajanja dijelova konstrukcije zrakoplova je zakovicama. Kako bi se omogućio pristup svim komponentama u svrhu redovitog održavanja i popravaka spoj zakovicama je logičan izbor zbog jednostavne montaže te lakog pristupa spoju. Konstrukcija poda helikoptera *Westland WG30* sastoji se od niza okvira, oplata i ukruta međusobno spojenih

zakovičnim spojevima. Korak zakovice iznosi 25 mm, a ukupno je definirano 2345 zakovičnih spojeva u cijelo modelu prema [7].

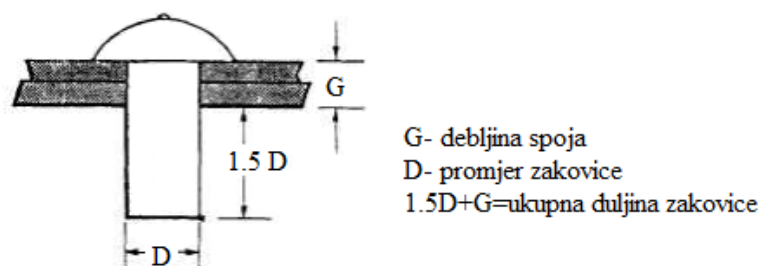
### 3.6.1. Značajke zakovičnog spoja

Kako bi se pravilno izvela numerička analiza zakovičnog spoja potrebno je poštivati određene tehničke zahtjeve za konstrukciju zakovica koji su opisani u sljedećim poglavljima.

#### 3.6.1.1. Potrebna duljina zakovice

Za određivanje potrebne duljine zakovice, važno je poznavati debljinu elemenata koji se spajaju u cjelinu. Duljina tijela zakovice jednaka je zbroju debljina elemenata koji se spajaju i dodatka potrebnog za formiranje glave zakovice, čija duljina je jednaka 1,5 promjera zakovice [10].

Slika 19 predstavlja značajke za izračunavanje potrebne duljine zakovica.



**Slika 19. Potrebna duljina zakovice [10]**

Prema [4] promjer zakovice korištene kod konstrukcije poda helikoptera *Westland WG30* iznosi 3,2 mm te je tako korišten i u ovom radu. Debljina spoja  $G$  djela konstrukcije poda na kojem će se simulirati zakovični spoj iznosi 2,1 mm prema tablici iz [4].

Potrebna duljina zakovice prema jednadžbi (2) iznosi:

$$1,5 D + G = 6,9 \text{ mm} \quad (2)$$

#### 3.6.1.2. Korak zakovica

Korak zakovica je udaljenost koja se mjeri između provrta za zakovice koje se nalaze u istom redu. Minimalan korak između ispupčenih zakovica ne bi smio biti manji od 3,5 promjera zakovice, a kod zakovica s ravnom glavom ta značajka ne bi smjela biti manja od 4 promjera zakovice [10].

Korak zakovica izračunava se prema jednadžbi (3) te se izračun za duljinu koraka prema [10] može vidjeti jednadžbom (4).

$$k \geq 3,5D \quad (3)$$

$$25 \geq 11,2$$

(4)

### 3.6.1.3. Udaljenost od ruba

Udaljenost koja se mjeri od centra prvog provrta zakovice pa do ruba. Generalno navodeći ta udaljenost ne bi smjela biti manja od dva ni veća od četiri promjera zakovice. Ako se zakovica ugradi preblizu ruba elemenata koji se spajaju može doći do pojave pukotina i popuštanja spoja [10].

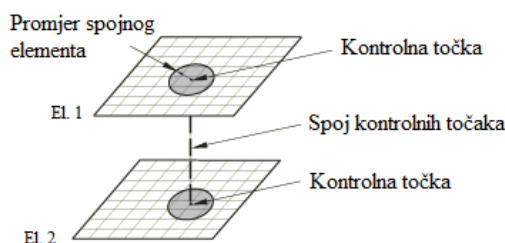
### 3.6.2. Numerička simulacija zakovičnog spoja

U programskom paketu *Abaqus* dostupne su kinematske veze koje služe za modeliranje mjesta spojeva elemenata. Elementi se mogu spajati po cijeloj dužini (*attachment line*) ili samo u jednoj ili više točaka (*attachment point*). U modelu je prvo potrebno kreirati kontrolne točke po plohama koje se međusobno spajaju, pošto se zakovični spojevi izrađuju poštivanjem određenih pravila (udaljenost zakovica od ruba, korak zakovica), to se može ostvariti naredbom (*Create attachment point by choosing edges and offsets*). Nakon kreiranja kontrolnih točaka slijedi definiranje veza između istih [10].

U ovom radu kontrolne točke na plohama su međusobno povezane grednim elementom (opcija *MPC Beam*).

*MPC (Multi Point Constraint)* su kinematske veze u kojima se zajedno povezuju različiti čvorovi i stupnjevi slobode gibanja. *MPC Beam* predstavlja ograničenje koje ostvaruje krutu vezu između pomaka referentnih točaka, a i rotacija, te tako oponaša tijelo zakovice. Najbolje je povezati ponašanje nekoliko čvorova (grupiranih u skup čvora) na jednu referentnu točku [10].

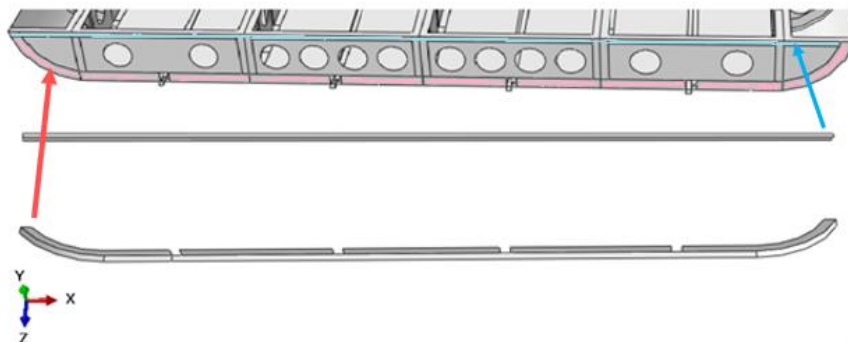
Slika 20 predstavlja način modeliranja spojeva neovisno o mreži konačnih elemenata koja će simulirati zakovični spoj u ovome radu.



**Slika 20. Modeliranje spojnog elementa [10]**

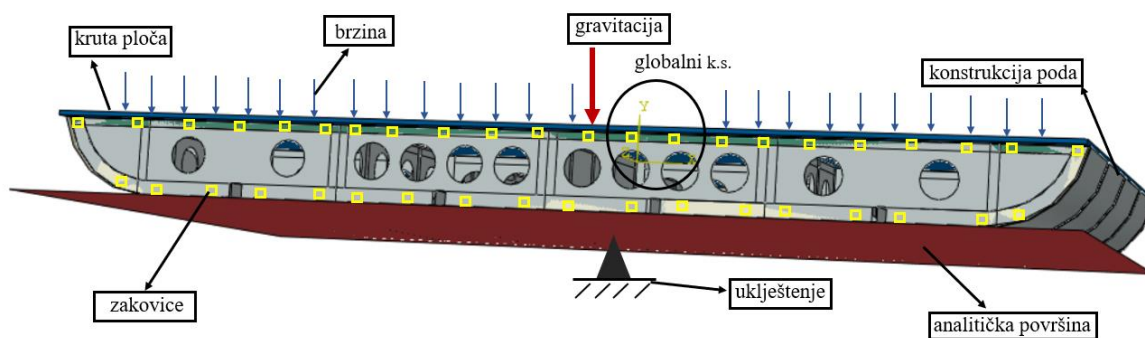
Iako je cijela konstrukcija pod helikoptera međusobno spojena zakovičnim spojevima, simulirani su samo na dijelu gdje su pokazane najveće deformacije okvira prema [4], tj. na

okviru "STN450F" kako bi se smanjilo vrijeme trajanja simulacije. Model je napravljen od konstrukcije poda helikoptera bez ukruta na mjestu okvira "STN450F" te samih ukruta L profila (ravna i zakrivljena) kako je vidljivo na Slici 21.



**Slika 21. Ukrute L profila i okvir "STN450F"**

Na ukrutama i duž plohe okvira "STN450F" kreirane su kontrolne točke kako je prethodno opisano te se zatim definira veza između ukruta i okvira pomoću naredbe *MPC Beam*. Radi pojednostavljenja konstrukcije nisu rađeni provrti na mjestima spoja zakovicama nego je simulirano bez njih. Prilikom simuliranja zakovica u programskom paketu *Abaqus* zadaje se opcijom *Fasteners* fizički polumjer zakovice koji predstavlja prostor koji bi zakovica zauzela. Slika 22 prikazuje model zakovičnog spoja iz programskog paketa *Abaqus* gdje su žutim kvadratima označena mjesta kontakta koja predstavljaju spoj zakovicama.



**Slika 22. Numerički model konstrukcije zakovicama**

Na slici se također može vidjeti opterećenje modela konstrukcije poda (brzina i gravitacija) te rubni uvjeti (uklještenje tj. onemogućenje pokreta i zakreta koji su identični modelu koji je napravljen bez zakovica).

Validacija rezultata numeričke simulacije jednodijelne aluminijske konstrukcije i konstrukcije spojene zakovicama prikazana je u poglavlju 5.

## 4. Kompozitna konstrukcija

Kompozitni materijali sastoje se od kombinacije materijala koji su spojeni zajedno kako bi stvorili specifična strukturna svojstva. Riječ je o dva osnovna konstituenta, vlaknu i matrici, koji čine međusobno povezane slojeve i tako tvore višeslojni kompozit (laminat). Vlakna su osnovni nosivi element kompozita i daju mu čvrstoću, dok matrica drži vlakna zajedno, ima važnu funkciju u prijenosu opterećenja na vlakno, daje vanjsku formu kompozitu, definira njegovo ponašanje obzirom na djelovanje atmosfere itd. [11].

Primjena kompozita u avio industriji uključuje:

- trup aviona,
- vrata podvozja,
- napadne i izlazne rubove krila i stabilizatora,
- komponente interijera putničke kabine,
- podne grede i podnicu,
- primarnu konstrukciju krila i trupa nove generacije velikih aviona,
- lopatice ventilatora motora turbine,
- propelere.

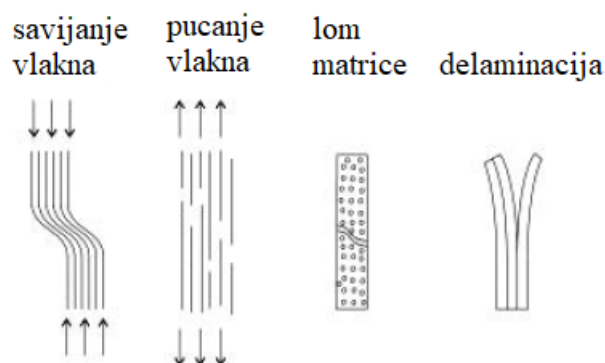
Svojstva konstrukcije, kao što su krutost, dimenzijska stabilnost i čvrstoća kompozitnog laminata, ovise o redoslijedu slaganja slojeva. Raspored slojeva opisuje distribuciju orijentacije sloja kroz debljinu laminata. Kako raste broj slojeva s odabranom orijentacijom, moguće je više nizova slaganja [12].

### 4.1. Hashinov kriterij popuštanja

Za razliku od izotropnih materijala (tehničkih metala) kod kompozita su mehanizmi popuštanja materijala bitno drugačiji, i ne mogu se opisati klasičnim pristupom. Samim time što se radi o spajanju često velikog broja slojeva, a niti sam sloj nije homogen nego se sastoji od barem dva konstituenta, jasno je da se popuštanje može dogoditi na vrlo različite načine. Najčešće se razmatraju:

- lom matrice,
- pucanje vlakna,
- izvlačenje i savijanje vlakna,
- delaminacija (odvajanje slojeva) [11].

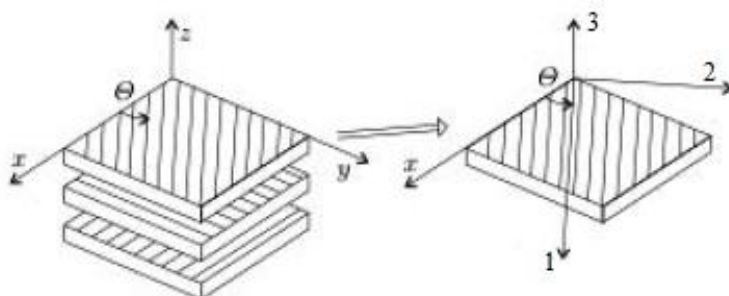
Prethodno navedene načine popuštanja prikazuje Slika 23.



**Slika 23. Načini popuštanja kompozita [13]**

Kriteriji se uvijek postavljaju za jedan sloj, a naprezanja su definirana u glavnom materijalnom sustavu [11].

Glavni materijalni koordinatni sustav predstavlja usmjerenost vlakna u jednom sloju te se označava s 1 – smjer pružanja vlakna, 2 – u ravnini, okomita na 1 i 3 – okomita na sloj kompozitnog materijala te se podudara s globalnim koordinatnim sustavom ( $x, y, z$ ) kako je vidljivo na Slici 24.



**Slika 24. Globalni i glavni materijalni koordinatni sustav [13]**

Nastupanje oštećenja u većini vlaknima ojačanim kompozitima u programskom paketu *Abaqus* određuje se prema *Hashin*-ovom kriteriju popuštanja opisanom u nastavku.

Kompozitni sloj spada u ortotropan materijal, koji sadrži tri međusobno okomite ravnine elastične simetrije. Kako bi se opisalo ponašanje materijala potrebna je veza između tenzora naprezanja i tenzora deformacija koju čini tenzor elastičnosti. Ta konstitutivna jednadžba u ravninskom stanju naprezanja prikazana je sljedećom jednadžbom:

$$\sigma = C_d \varepsilon \quad (5)$$

gdje je  $C_d$  matrica elastičnosti elementa koja uključuje i stanje oštećenosti, te iznosi:

$$\mathbf{C_d} = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} (1-d_f)E_1 & (1-d_f)(1-d_m)v_{21}E_1 & 0 \\ (1-d_f)(1-d_m)v_{12}E_1 & (1-d_m)E_2 & 0 \\ 0 & 0 & (1-d_s)GD \end{bmatrix}. \quad (6)$$

U jednadžbi (6)  $E_1$  predstavlja *Young*-ov modul u smjeru vlakna,  $E_2$  *Young*-ov module u smjeru matrice,  $G$  modul smicanja,  $v_{12}$  i  $v_{21}$  *Poisson*-ovi faktori,  $d_f$  predstavlja oštećenje vlakna,  $d_m$  parametar oštećenja matrice, a  $d_s$  parametar posmičnog oštećenja. Parametar  $D$  je definiran kao:

$$D = 1 - (1-d_f)(1-d_m)v_{12}v_{21}. \quad (7)$$

*Hashin*-ov kriterij popuštanja definiran je preko parametara čvrstoće sloja, pa je potrebno poznavati slijedeće parametre čvrstoće:

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

*Hashin*-ov kriterij pokriva četiri načina popuštanja:

- pucanje vlakna pod vlačnim opterećenjem,
- izvijanje vlakna pod tlačnim opterećenjem,
- lom matrice pod poprečno vlačnim opterećenjem,
- lom matrice pod poprečno tlačnim opterećenjem [14].

Prema [9] matematičke formulacije kriterija popuštanja iznose:

$$F_f^t = \left( \frac{\hat{\sigma}_{11}}{X^T} \right)^2 + \alpha \left( \frac{\hat{\tau}_{12}}{S^L} \right)^2, \quad (8)$$

$$F_f^c = \left( \frac{\hat{\sigma}_{11}}{X^C} \right)^2, \quad (9)$$

$$F_m^t = \left( \frac{\hat{\sigma}_{22}}{Y^T} \right)^2 + \left( \frac{\hat{\tau}_{12}}{S^L} \right)^2, \quad (10)$$

$$F_m^c = \left( \frac{\hat{\sigma}_{22}}{2S^T} \right)^2 + \left[ \left( \frac{Y^C}{2S^T} \right)^2 - 1 \right] \frac{\hat{\sigma}_{22}}{Y^C} + \left( \frac{\hat{\tau}_{12}}{S^L} \right)^2. \quad (11)$$

Jednadžba (8) predstavlja vlačno opterećenje vlakna ( $\hat{\sigma}_{11} \geq 0$ ), (9) tlačno opterećenje vlakna ( $\hat{\sigma}_{11} < 0$ ), (10) vlačno opterećenje matrice ( $\hat{\sigma}_{22} \geq 0$ ) i jednadžba (11) tlačno opterećenje matrice ( $\hat{\sigma}_{22} < 0$ ). Parametar  $\alpha$  u jednadžbi (8) predstavlja koeficijent koji određuje utjecaj

posmičnog naprezanja u nastajanju oštećenja vlakna pri vlačnom opterećenju, a  $\hat{\sigma}_{11}$ ,  $\hat{\sigma}_{22}$  i  $\hat{\tau}_{12}$  predstavljaju komponente efektivnog tenzora naprezanja,  $\hat{\sigma}$ , koji se koristi kako bi se evaluiralo naprezanje u oštećenom vlaknu, a definiran je jednažbom (12):

$$\hat{\sigma} = \mathbf{M}\sigma \quad (12)$$

gdje je  $\mathbf{M}$  operator oštećenja koji iznosi:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \frac{1}{(1-d_f)} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{(1-d_m)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{(1-d_s)} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$d_f$ ,  $d_m$  i  $d_s$  unutarnje varijable oštećenja koje karakteriziraju vlakno, matricu i posmično oštećenje, a ovisne su o načinu opterećenja:

$$d_f = \begin{cases} d_f^t & \text{za } \hat{\sigma}_{11} \geq 0 \\ d_f^c & \text{za } \hat{\sigma}_{11} < 0 \end{cases} \quad (14)$$

$$d_f = \begin{cases} d_m^t & \text{za } \hat{\sigma}_{22} \geq 0 \\ d_m^c & \text{za } \hat{\sigma}_{22} < 0 \end{cases} \quad (15)$$

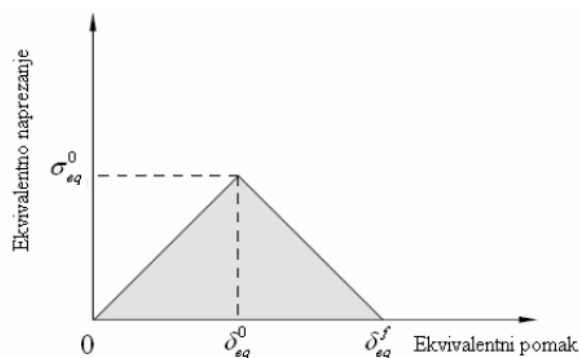
$$d_s = 1 - (1 - d_f^t)(1 - d_f^c)(1 - d_m^t)(1 - d_m^c). \quad (16)$$

Prije nego nastupi oštećenje operator oštećenja ( $\mathbf{M}$ ) iznosi 1, te je prema jednažbi (12)  $\hat{\sigma} = \sigma$ .

Jednom kada se pojavi naznaka nastupanju oštećenja, operator oštećenja postaje značajan u kriteriju popuštanja za više načina popuštanja.

U slučajevima gdje je specificiran model oštećenja, u [9] se opisuje stanje materijala poslije oštećenja.

Varijabla oštećenja će evoluirati tako da odnos naprezanje – pomak prati *Hookeov* dijagram za vlaknima ojačane kompozite do inicijacije oštećenja, prikazan na Slici 25 u svakom od četiri načina popuštanja.



Slika 25. *Hookeov* dijagram za vlaknima ojačan kompozit [9]

Rastući pravac na dijagramu odnosi se na linearno elastično ponašanje do trenutka nastajanja oštećenja. Površina ispod krivulja iznosi vrijednost potrošene energije. Nakon točke u kojoj nastupa oštećenje, pravac postaje padajući tj. za veći pomak postiže se manje naprezanje. Negativan koeficijent smjera padajućeg pravca dobiven je jednadžbom (17)

$$d = \frac{\delta_{eq}^f (\delta_{eq} - \delta_{eq}^0)}{\delta_{eq} (\delta_{eq}^f - \delta_{eq}^0)}. \quad (17)$$

gdje je s  $\delta_{eq}^0$  označen ekvivalentni pomak pri kojemu nastaje oštećenje, a s  $\delta_{eq}^f$  ekvivalentni pomak potpunog popuštanja sloja po jednom od četiri načina popuštanja. Ekvivalentni pomak i naprezanja za svaki način popuštanja definiran je pomoću jednadžbi (18) – (25):

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

$$\delta_{eq}^{ft} = L^c \sqrt{\langle \varepsilon_{11} \rangle^2 + \alpha \varepsilon_{12}^2}, \quad (18)$$

$$\sigma_{eq}^{ft} = L^c \frac{\langle \sigma_{11} \rangle \langle \varepsilon_{11} \rangle + \alpha \tau_{12} \varepsilon_{12}}{\delta_{eq}^{ft} / L^c}, \quad (19)$$

- za tlačno opterećenje vlakna ( $\hat{\sigma}_{11} < 0$ ):

$$\delta_{eq}^{fc} = L^c \langle -\varepsilon_{11} \rangle, \quad (20)$$

$$\sigma_{eq}^{fc} = \frac{\langle -\sigma_{11} \rangle \langle -\varepsilon_{11} \rangle + \langle -\sigma_{11} \rangle}{\delta_{eq}^{fc} / L^c}, \quad (21)$$

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

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

$$\sigma_{eq}^{mt} = \frac{\langle \sigma_{22} \rangle \langle \varepsilon_{22} \rangle + \tau_{12} \varepsilon_{12}}{\delta_{eq}^{mt} / L^c}, \quad (23)$$

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

$$\delta_{eq}^{mc} = L^c \sqrt{\langle -\varepsilon_{22} \rangle^2 + \varepsilon_{12}^2}, \quad (24)$$

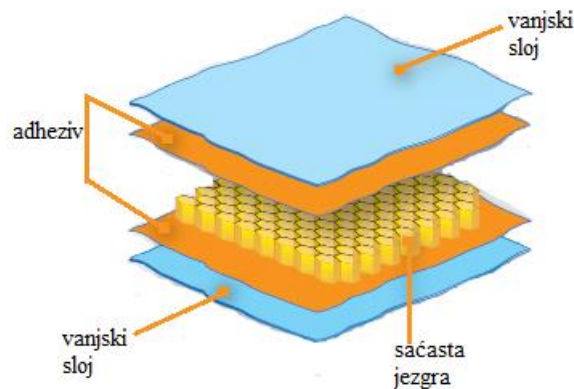
$$\sigma_{eq}^{mc} = \frac{\langle -\sigma_{22} \rangle \langle -\varepsilon_{22} \rangle + \tau_{12} \varepsilon_{12}}{\delta_{eq}^{mc} / L^c}. \quad (25)$$

gdje  $L^c$  predstavlja karakterističnu duljinu elementa, koji ovisi o dimenzijama konačnog elementa, a za ljuskasti element se određuje kao korijen njegove površine. Simbol  $\langle \rangle$  koristi se kao *Macaulayev* operator koji je definiran kao  $\langle \alpha \rangle = (\alpha + |\alpha|)/2$  za svaki  $\alpha \in \mathbb{R}$ .

Popuštanje konačnog elementa će nastupiti ako su svi slojevi kompozita popustili načinu popuštanja vlakana (vlačno ili tlačno) prethodno opisanom u *Hashinovom* kriteriju.

## 4.2. Sandwich kompoziti

"Sandwich" kompozit spada u skupinu strukturnih kompozita koji se sastoji od vanjskih slojeva i sačaste jezgre kako je prikazano na Slici 26.



Slika 26. Struktura sandwich kompozita [12]

Vanjski slojevi su najčešće izotropni materijali ili vlaknom ojačani kompozitni laminat, a potrebno je naglasiti da njihova debljina mora biti znatno manja u usporedbi s debljinom jezgre. Jezgra može biti u obliku pčelinjih saća (šesterokutne ćelije) ili od pjene te joj ravnina simetrije mora biti paralelna na srednju površinu laminata.

Sandwich kompoziti se često koriste umjesto čvrstih ploča zbog velike mogućnosti savojne krutosti, a male težine. Savojna krutost je rezultat udaljenosti između vanjskih slojeva, koji nose opterećenje, a mala težina je posljedica male gustoće jezgre [13].

### 4.2.1. Osnovne relacije kod sandwich kompozita [13]

Prema analogiji s teorijom ravnih ploča za male deformacije normala nakon deformiranja ostaje ravna, ali ne nužno okomita na srednju (referentnu) površinu. U tom slučaju pomaci u smjeru osi  $x$  i  $y$  u odnosu na referentnu plohu dani su izrazima:

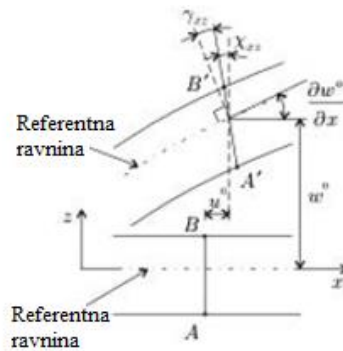
$$u = u^0 - z\chi_{xz}, \quad (26)$$

$$v = v^0 - z\chi_{yz} \quad (27)$$

gdje su  $u^0$  i  $v^0$  pomaci normale u odnosu na referentnu površinu ( $z = 0$ ), a  $\chi_{xz}$  i  $\chi_{yz}$  zakreti normale u  $xz$  i  $xy$  ravnini ilustrirani na Slici 27.

Također se na slici može vidjeti označena prva derivacija progiba  $w^0$  s obzirom na os  $x$  koja glasi:

$$\frac{\partial w^0}{\partial x} = \chi_{xz} + \gamma_{xz}. \quad (28)$$



Slika 27. Deformacije sandwich ploče u xz ravnini [13]

Koristeći prethodno navedene derivacije dobivaju se deformacije na referentnoj površini koje glase:

$$\varepsilon_x^0 = \frac{\partial u^0}{\partial x}, \quad (29)$$

$$\varepsilon_y^0 = \frac{\partial v^0}{\partial y}, \quad (30)$$

$$\gamma_{xy}^0 = \frac{\partial u^0}{\partial y} + \frac{\partial v^0}{\partial x}. \quad (31)$$

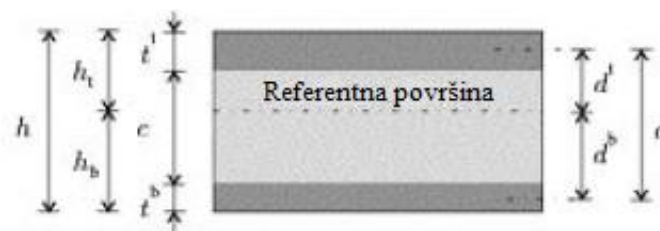
$\varepsilon_x^0$  i  $\varepsilon_y^0$  su duljinske deformacije referentne površine, a  $\gamma_{xy}^0$  kutna deformacija. Tim jednadžbama tvori se veza između pomaka i deformacija kod sandwich ploča, a preko sljedećih jednadžbi biti će prikazana veza između unutarnjih sila i momenata s naprezanjem pomoću čega će se dobiti veza sila i deformacija :

$$N_x = \int_{-h_b}^{h_t} \sigma_x dz, \quad N_y = \int_{-h_b}^{h_t} \sigma_y dz, \quad N_{xy} = \int_{-h_b}^{h_t} \tau_{xy} dz, \quad (32)$$

$$M_x = \int_{-h_b}^{h_t} z \sigma_x dz, \quad M_y = \int_{-h_b}^{h_t} z \sigma_y dz, \quad M_{xy} = \int_{-h_b}^{h_t} z \tau_{xy} dz, \quad (33)$$

$$Q_x = \int_{-h_b}^{h_t} \tau_{xz} dz, \quad Q_y = \int_{-h_b}^{h_t} \tau_{yz} dz. \quad (34)$$

$N_i, M_i, Q_i$  su unutarnje uzdužne sile, momenti i unutarnje poprečne sile u ploči po jedinici duljine, a  $h_t$  i  $h_b$  udaljenosti između vanjskih površina ploča i odabrane referentne površine kako je prikazano na Slici 28.



Slika 28. Geometrija sandwich ploče [13]

Zakrivljenost je mjera odstupanja od pravocrtnosti, označuje se s  $\kappa_x, \kappa_y, \kappa_{xy}$  te se definira kao:

$$\kappa_x = -\frac{\partial \chi_{xz}}{\partial x}, \quad \kappa_y = -\frac{\partial \chi_{yz}}{\partial y}, \quad \kappa_{xy} = -\frac{\partial \chi_{xz}}{\partial y} - \frac{\partial \chi_{yz}}{\partial x}. \quad (35)$$

Veza između sila i deformacija može se pokazati preko matrica krutosti:

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{B} & \mathbf{D} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix}. \quad (36)$$

$\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{D}$  su matrice istezne, spregnute i savojne krutosti.

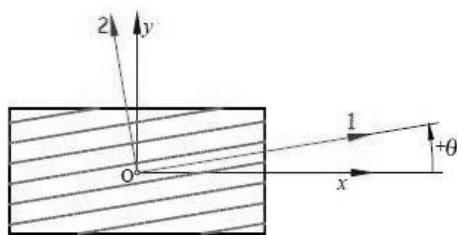
Matrice krutosti izračunavaju se preko izraza (37) – (39).

$$[\mathbf{A}] = \int_{-h_b}^{h_t} [\bar{\mathbf{Q}}] dz, \quad (37)$$

$$[\mathbf{B}] = \int_{-h_b}^{h_t} z[\bar{\mathbf{Q}}] dz, \quad (38)$$

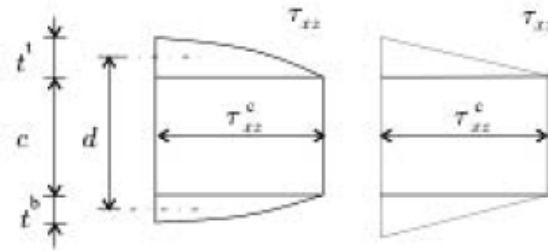
$$[\mathbf{D}] = \int_{-h_b}^{h_t} z^2[\bar{\mathbf{Q}}] dz. \quad (39)$$

$\bar{\mathbf{Q}}$  je transformirana reducirana matrica elastičnosti. Transformirana reducirana matrica elastičnosti označava vezu između naprezanja i deformacije te se odnosi na globalni koordinatni sustav  $(x, y, z)$ . Transformacija vlakana se koristi u slučaju kada postoje vlakna usmjerena pod kutom koji se ne podudara s glavnim osima globalnog koordinatnog sustava (transformacija iz glavnog materijalnog  $(1, 2, 3)$  u globalni koordinatni sustav  $(x, y, z)$ ) prikazano na Slici 29.



**Slika 29. Transformacija vlakana [13]**

Ako se uzme kao pretpostavka da jezgra *sandwich* konstrukcije ne utječe na krutost u ravnini srednje površine, kao rezultat toga posmično naprezanje  $\tau_{xz}$  je ujednačeno. Raspodjela posmičnog naprezanja prikazana je Slikom 30, lijevo, ali radi pojednostavljenja, raspodjela se svodi na linearnu (na Slici 30 desno).



**Slika 30. Raspodjela posmičnog naprezanja  $\tau_{xz}$  (lijevo) i aproksimirana raspodjela (desno) [13]**

Prema jednadžbi (34) i Slici 30 poprečna sila određuje se izrazom:

$$Q_x = \int_{-h_b}^{h_t} \tau_{xz} dz = \tau_{xz}^c c + \tau_{xz}^c \frac{t^t}{2} + \tau_{xz}^c \frac{t^b}{2} = \tau_{xz}^c d, \quad (40)$$

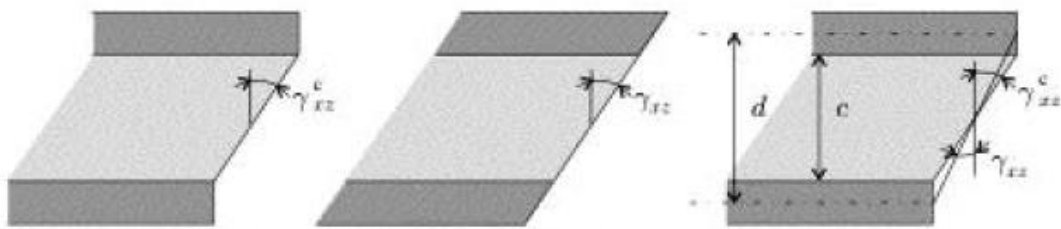
gdje eksponenti  $c$ ,  $b$  i  $t$  označuju *core* (jezgru), *bottom* (donji vanjski sloj) i *top* (gornji vanjski sloj), a udaljenost  $d$  jednaka je:

$$d = c + \frac{t^t}{2} + \frac{t^b}{2}. \quad (41)$$

Veza između posmičnog naprezanja i deformacija je

$$\begin{bmatrix} \tau_{xz}^c \\ \tau_{yz}^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{C}_{55}^c & \bar{C}_{45}^c \\ \bar{C}_{45}^c & \bar{C}_{44}^c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma_{xz}^c \\ \gamma_{yz}^c \end{bmatrix}, \quad (42)$$

gdje su  $\bar{C}_{ij}^c$  članovi matrice elastičnosti jezgre.



**Slika 31. Kutna deformacija jezgre [12]**

Na Slici 31 prikazana je raspodjela kutne deformacije  $\gamma_{xz}^c$  vanjskih slojeva, čime se dobiva odnos između kutne deformacije i deformacije jezgre koji glasi:

$$\gamma_{xz}^c = \frac{d}{c} \gamma_{xz}. \quad (43)$$

Pomoću jednadžbi (42) i (43) konačna veza poprečnih sila deformacija je

$$\begin{bmatrix} Q_x \\ Q_y \end{bmatrix} = \frac{d^2}{c} \begin{bmatrix} \bar{C}_{55}^c & \bar{C}_{45}^c \\ \bar{C}_{45}^c & \bar{C}_{44}^c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{bmatrix}, \quad (44)$$

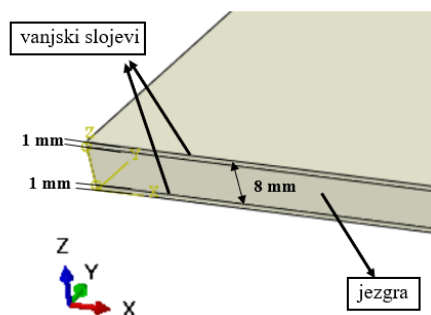
gdje je :

$$\mathbf{H} = \frac{d^2}{c} \begin{bmatrix} \overline{C^c}_{55} & \overline{C^c}_{45} \\ \overline{C^c}_{45} & \overline{C^c}_{44} \end{bmatrix}, \quad (45)$$

tj. matrica posmične krutosti *sandwich* konstrukcija.

#### 4.2.2. Numerički model *sandwich* kompozita

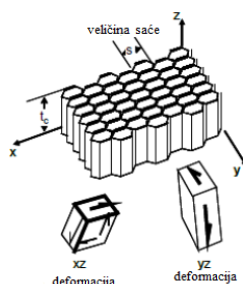
Kompozitni numerički model čini podnica u obliku ravne ploče, dimenzija 2250 x 1300 mm<sup>2</sup> te napravljena od *sandwich* kompozita, koja se spaja direktno na površinu aluminijske konstrukcije poda helikoptera *Westland WG30* opisane u poglavlju 2.2. Model podnice napravljen je direktno u programskom paketu *Abaqus* kao *3D Solid* model kako bi se bolje modelirala saćasta jezgra i vanjski slojevi *sandwich* kompozita. Vanjski slojevi su od jezgre odvojeni opcijom *Partition Face* te je sam model prikazan na Slici 32.



Slika 32. Model *sandwich* podnice

##### 4.2.2.1. Materijalni model

Kod numeričke analize kompozitnih materijala materijalni model je vrlo bitan jer se u njemu zadaju i parametri čvrstoće slojeva. *Sandwich* podnica se u ovom slučaju sastoji od vanjskih slojeva napravljenih od staklenih vlakana (*GFRP*) ojačanih epoksidnom smolom te saćaste jezgre od *Nomex*-a. *Nomex* je meta-aramidni papir koji se najčešće koristi kao saćasta jezgra u avio industriji.



Slika 33. Dimenzije saća jezgre [13]

Slika 33 predstavlja strukturu *Nomex* jezgre s osnovnim dimenzijama kao što su visina jezgre i veličina jezgrine saće. Debljina podnice iznosi 10 mm, gdje 8 mm zauzima visina jezgre, a

ostala 2 mm (svaki po 1 mm) vanjski slojevi. Orijentacija vanjskih slojeva *GFRP*/epoksi iznosi  $[0/90/0/90]_s$ .

Iz jednadžbe je vidljivo da se radi o simetričnom rasporedu slojeva, po četiri sloja u svakom vanjskom sloju *sandwich* kompozita, debljine sloja 0,25 mm.

Tablica 4 prikazuje standardna mehanička svojstva jedno usmjerenih staklenih vlakana (*S-glass*) ojačanih epoksidnom matricom koja su korištena u ovom radu.

**Tablica 4. Mehanička svojstva *GFRP* materijala vanjskih slojeva [13]**

| $E_1$ [MPa] | $E_2$ [MPa] | $\nu_{12}$ [-] | $G_{12}$ [MPa] | $G_{13}$ [MPa] | $G_{23}$ [MPa] | $\rho$ [t/mm <sup>3</sup> ] |
|-------------|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------------------|
| 80000       | 8000        | 0,2            | 30000          | 30000          | 24000          | $2 \cdot 10^{-9}$           |

Tablica 5 prikazuje parametre čvrstoće preko kojih se definira *Hashin*ov kriterij popuštanja.

**Tablica 5. Parametri čvrstoće *GFRP* materijala vanjskih slojeva [13]**

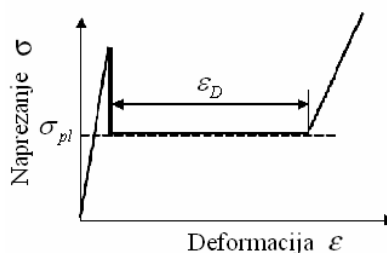
| $X^T$<br>[MPa] | $X^C$<br>[MPa] | $Y^T$<br>[MPa] | $Y^C$<br>[MPa] | $S$ [MPa] | $G_{ft}$<br>[N/mm] | $G_{fc}$<br>[N/mm] | $G_{mt}$<br>[N/mm] | $G_{mc}$<br>[N/mm] |
|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 1725           | 690            | 49             | 158            | 70        | 85                 | 106,3              | 1                  | 1                  |

Za razliku od ortotropnih vanjskih slojeva, *Nomex* je izotropan materijal te su mehanička svojstva prikazana u Tablici 6.

**Tablica 6. Mehanička svojstva *Nomexa* [14]**

| $E$<br>[MPa] | $\nu$ | $\rho$ [t/mm <sup>3</sup> ] | $\sigma_y$ [MPa] |   |   | $\varepsilon_{pl}$ [-] |      |   |
|--------------|-------|-----------------------------|------------------|---|---|------------------------|------|---|
| 414          | 0,28  | $33 \cdot 10^{-10}$         | 2,25             | 1 | 1 | 0                      | 0,03 | 1 |

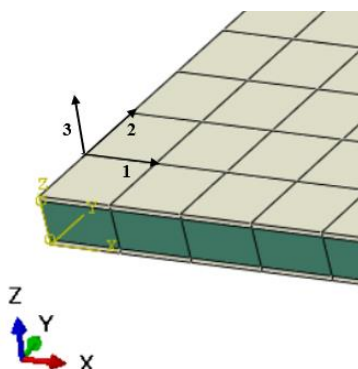
Ponašanje jezgre se definira kao linearno elastično-plastično što znači da se jezgra *sandwich* konstrukcije ponaša linearno elastično dok naprezanje ne dostigne graničnu vrijednost  $\sigma_y$  nakon koje se ponaša idealno plastično. Ta svojstva prikazana su dijagramom na Slici 34 te parametrima u Tablici 6.



**Slika 34. Hookeov dijagram tlačnog opterećenja *Nomexa* [14]**

Kako je već prethodno opisano u poglavlju 3.5 za aluminijsku konstrukciju, *shear failure* je dodan i za jezgru od *Nomexa*. Lom jezgre aproksimira se kriterijem popuštanja pri ekvivalentnoj plastičnoj deformaciji od 85 % koja je odabrana zbog pada krutosti jezgre pri od prilike toj vrijednosti.

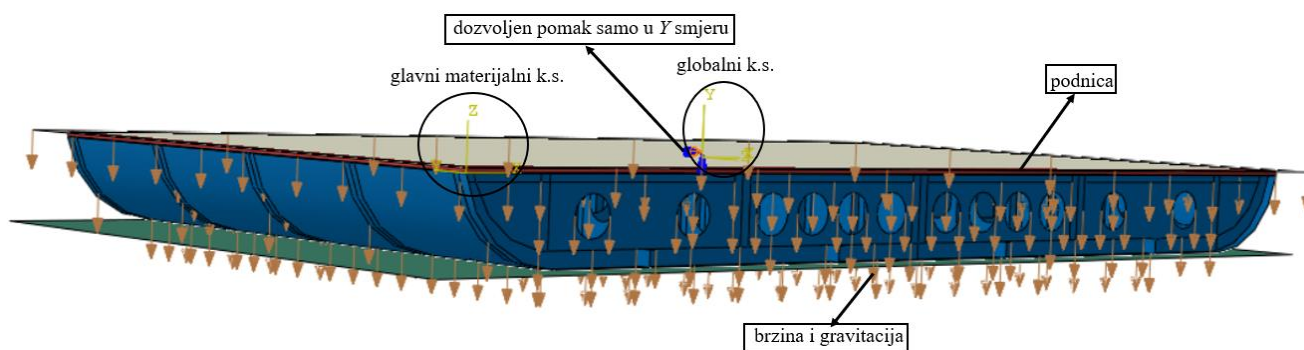
Slika 35 prikazuju orijentaciju slojeva iz programskog paketa *Abaqus* za vanjske slojeve orijentirane pod  $0^\circ$ . Materijalni koordinatni sustav prati globalni koordinatni sustav kako je prikazano na slici tj. os 1 se proteže u smjeru osi vlakna, a 2 okomito. Mreža konačnih elemenata biti će detaljnije objašnjena u nastavku.



Slika 35. Orijentacija vanjskog sloja od  $0^\circ$

#### 4.2.2.2. Opterećenje i rubni uvjeti

Kompozitna podnica je montirana na aluminijsku konstrukciju podla helikoptera *Westland WG30* kako je prikazano na Slici 36 gdje je označena crvenom bojom.



Slika 36. Sklop konstrukcije za simulaciju vertikalnog udara

Na model kompozitne podnice smještena je kruta ploča kojom je modeliran utjecaj ostatka mase konstrukcije helikoptera *Westland WG30* kao što je opisano u poglavlju 3.5. Jedina je razlika što je kruta ploča u ovome slučaju modelirana kao 2D ravna ploča opcijom *Discrete Rigid* čime se postigla krutost ploče i zanemarene su njene deformacije. Zbog problema s kontaktom

između krute ploče i SC8R elemenata vanjskih slojeva *sandwich* kompozita ne zamjetno (0,5 mm) su odmaknuti jedan od drugoga te je posvećena posebna pozornost gustoći mreže krute ploče.

Iako je ovakav sustav napravljen kako bi pratio eksperimentalni postav opisan u poglavlju 2.3, nije dosljedan načinu opterećenja koje se događa u stvarnosti pri vertikalnom udaru u tlo poda helikoptera jer je na taj način podnica jednoliko opterećena inercijskim silama konstrukcije helikoptera. Zbog toga je u ovom radu definiran i drugi način opterećenja pomoću modela sjedala koja se nalaze na podnici helikoptera o čemu će riječ biti više u poglavlju 4.3.

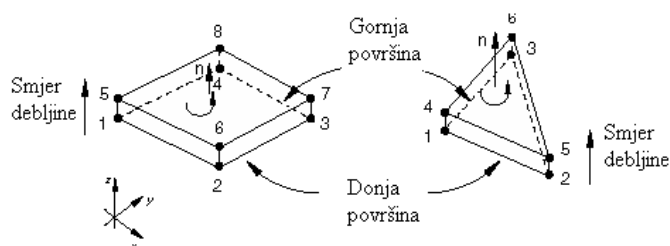
Opterećenje i rubni uvjeti zadani su identično kao na Slici 17, tj. dozvoljeni su pomaci samo u  $y$  smjeru, a opterećena je cijela konstrukcija jednolikom brzinom od 8m/s, gravitacijom te je dodana masa ostatka konstrukcije u središte krute ploče.

#### 4.2.2.3. Mreža konačnih elemenata

Kako bi se najbolje prikazao stvarni izgled konstrukcije *sandwich* kompozita, jezgra je diskretizirana pomoću heksaedarskih *3D Stress* linearnih elemenata (C3D8R), a vanjski slojevi pomoću heksaedarskih *Continuum Shell* elemenata (SC8R). Mreža jezgre se sastoji od 13050 elemenata, a svaki vanjski sloj od 13050 elemenata i 26576 čvorova. Podnica je diskretizirana s ukupno 39150 elementa.

Rješavanje problema čvrstoće za velik broj konstrukcijskih elemenata zahtijeva analizu korištenjem 3D elemenata. Za postizanje iste točnosti kao za jednodimenzionalne i dvodimenzionalne probleme, u trodimenzionalnoj analizi potreban je mnogo veći broj stupnjeva slobode. Heksaedarski konačni element učestali je element u trodimenzionalnoj analizi konačnih elemenata. Nastaje tako da se dvije Kartezijeve koordinate  $x$  i  $y$  proširuju trećom koordinatom  $z$ . Polje pomaka opisuje se komponentama  $u$ ,  $v$  i  $w$  u pravcu globalnih Kartezijevih koordinatnih osi. Element sadrži 8 čvorova sa po 3 stupnja slobode u svakom čvoru [7].

Kontinuirani ljuskasti elementi razlikuju se od običnih konvencionalnih ljuskastih elemenata korištenih pri izradi 2D geometrije time što se njima diskretizira 3D geometrija. Sadrže 8 čvorova s translacijskim stupnjevima slobode gibanja u svakom čvoru. Pošto se radi o analizi korištenjem 3D elemenata bitan je smjer normale jer se u odnosu na njen smjer definira svojstvo debljine. Određivanje redoslijeda normale te prikaz kontinuiranog ljuskastog konačnog elementa može se vidjeti na Slici 37.



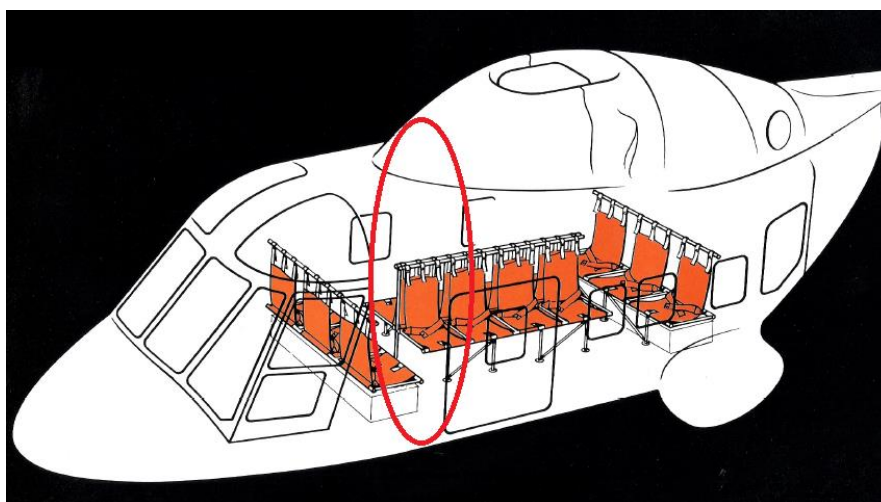
**Slika 37. Određivanje smjera normale kontinuiranih ljuskastih elemenata [9]**

Mrežu konačnih elemenata podnice diskretiziranu kontinuiranim ljuskastim (sivo) i trodimenzionalnim heksaedarskim (zeleno) elementima prikazana je na Slici 35. Kontinuirani konačni elementi koriste materijal u ravninskom stanju naprezanja.

#### 4.3. Konstrukcija sa sjedalima

Konstrukcija poda trupa helikoptera *Westland WG30* sastoji se većim dijelom od aluminijske konstrukcije, vijčano spojene kompozitne podnice na koju su direktno montirane spojnice sjedala posade. Iako je u eksperimentalnom dijelu korišten utjecaj krute čelične ploče kao nadomjestak mase ostatka konstrukcija radi pojednostavljenja postave eksperimenta pokazalo se kako to nije realan prikaz opterećenja konstrukcije poda te će u nastavku podnica helikoptera biti opterećena lokalno, sjedalima s dodatnom masom putnika.

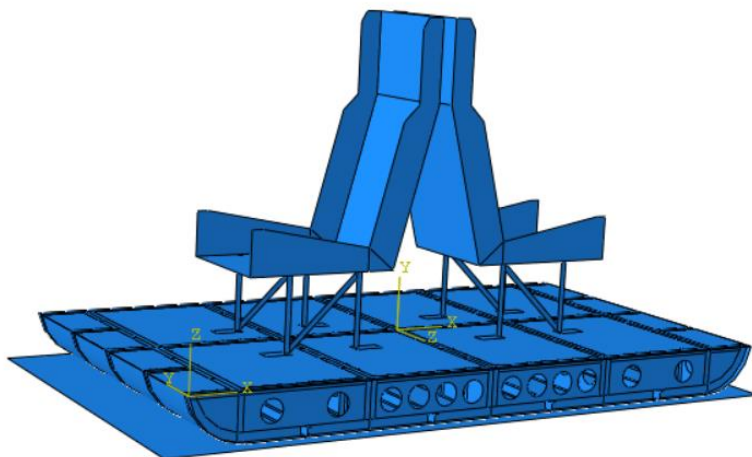
Ilustraciju rasporeda sjedala posade za 14 potpuno opremljenih članova posade (do 120 kg) može se vidjeti na Slici 38. Crvenim ovalom označeno je područje razmatranja konstrukcije poda kao što je bilo prikazano na Slici 7.



**Slika 38. Ilustracija rasporeda sjedala posade [2]**

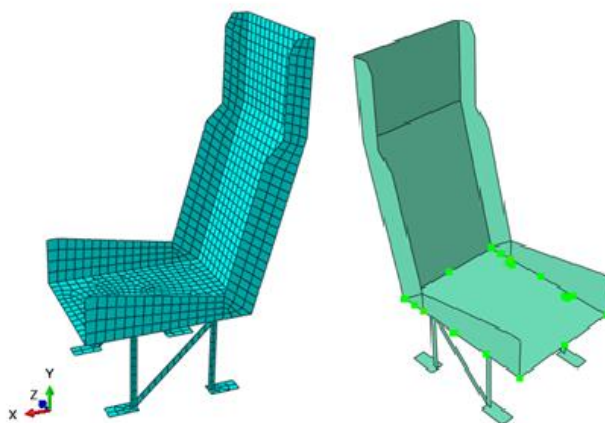
Model poda sa sjedalima korišten u daljnjoj simulaciji prikazan je na Slici 39. Gabariti sjedala iznose 1300 x 550 mm.

Geometrija sjedala je napravljena također u CAD programu *SolidWorks* koristeći površine (2D geometriju) čija je debljina dodana naknadno u programskom paketu *Abaqus*. Debljina područja sjedenja i naslona iznosi 10 mm, dok su noge ojačane s 20 mm kako ne bi popustile pritisku.



**Slika 39. Model poda helikoptera sa sjedalima**

Materijal sjedala je isti kao i konstrukcije poda, aluminij *Al2014*. Površina sjedećeg mjesta opterećena je dodatnom masom opcijom *Nonstructural mass* kako je prikazano na Slici 40.



**Slika 40. Prikaz opterećenja sjedala i mreže konačnih elemenata**

Masa kojom je opterećeno svako sjedalo iznosi 85 kg, što je prosječna masa muške osobe. Sjedala su čvrsto vezana za kompozitnu podnicu *tie* vezom te su opterećena kao i ostatak konstrukcije; gravitacijom te brzinom vertikalnog pada od 8 m/s kako bi se simulirala dinamička analiza.

Mreža konačnih elemenata sjedala sastoji se od 1334 ljuskastih linearnih kvadratnih elemenata S4R te 16 trokutastih S3 elemenata kako je prikazano na Slici 40.

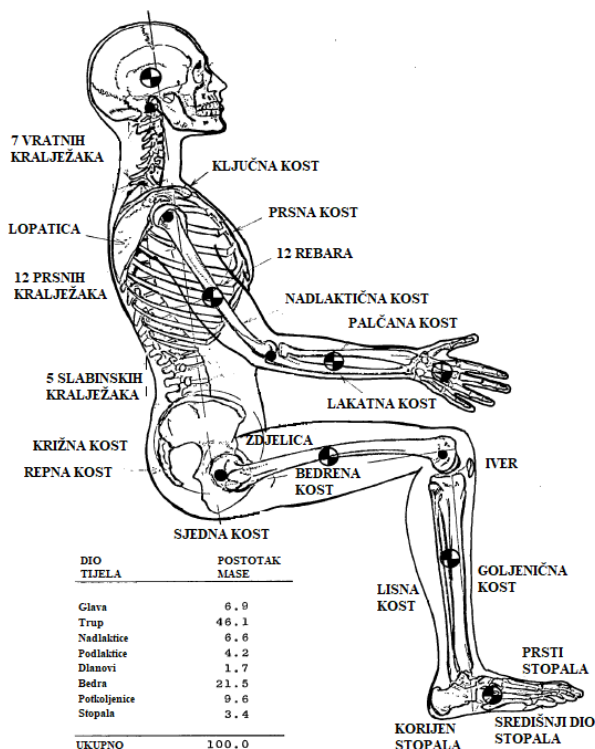
Cijeli model poda helikoptera sa sjedalima diskretiziran je pomoću 78402 elementa te 80164 čvora.

#### 4.3.1. Poboljšana konstrukcija sjedala

U inženjerstvu tijelo se proučava kao konstrukcija opterećena na dinamička i statička opterećenja. Tijelo u tom smislu je sustav fleksibilno spojenih krutih članova, te zato mora biti podržan izvana kako se ne bi stvorili pre veliki momenti i sile između dijelova. Za putnika u sjedećem položaju na kojeg utječu nagle sile ubrzanja i usporavanja, dijelovi tijela koji zahtijevaju suzdržanost su područje zdjelice, gornji dio prsnog koša te glava.

Glava mora biti suzdržana od ventralnih i dorzalnih trzajnih ozljeda koje se mogu razviti na sedam vratnih kralježaka. Gornji dio torza mora biti spriječen od okretanja oko zdjeličnog područja. Većina mase tijela nalazi se u gornjem dijelu torza te stoga to područje čini relativno krutu strukturu. Vertikalna tlačna akceleracija gornjeg tijela skoro je potpuno potpomognuta slabinskim kralješcima te se u tom području mogu očekivati veća naprezanja [16].

Slika 41 predstavlja nomenklaturu kostura čovjeka s postocima mase glavnih dijelova tijela u svrhu boljeg shvaćanja prethodno navedenih potencijalnih kritičnih mjesta ozljeda.

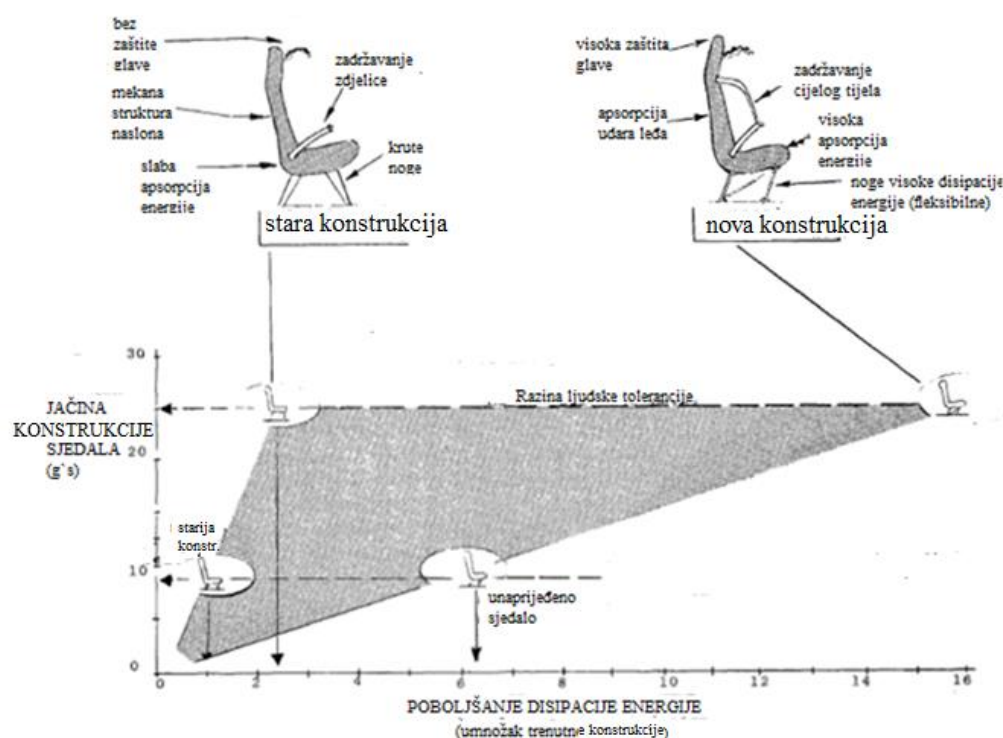


Slika 41. Nomenklatura kostura čovjeka [16]

Kao što je već spomenuto ranije, većina ozljeda putnika u avio industriji može biti ublažena uporabom pravilno konstruiranih sjedala s dobrom apsorpcijom energije udara.

Uporaba duktilnih konstrukcija je poželjna s obzirom da bi to omogućilo deformacije i slabljenje umjesto potpunog loma sjedala. Uvijek kada je moguće, sjedala putnika trebala bi biti spojena na površinu konstrukcijske cijelost, kao što je pod. Spajanjem na drugačije konstrukcije mogu nastati deformacije koje će uzrokovati ozbiljnu torziju spojnica sjedala, što će rezultirati većim naprezanjima i deformacijama.

Dva su praktična zahtjeva koja treba uzeti u obzir pri poboljšanju sigurnosti putnika. Prvi je da vitalni dijelovi putnika moraju biti udaljeni od mjesta potencijalnog rasta akceleracijskog opterećenja. Drugo, opterećenja prenesena na tijelo moraju biti translahirana u potporni sustav sjedala [16].



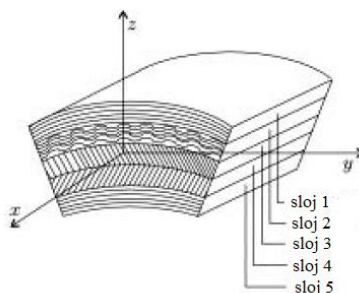
**Slika 42. Poboljšanje konstrukcije sjedala helikoptera na udar [16]**

Slika 42 prikazuje poboljšanje u apsorpciji energije kod konstrukcije sjedala za putnike helikoptera. Neka od svojstva naglašena na slici su naslon za glavu, apsorpcija udara kod područja leđa, kvalitetni sustav remenja za pridržavanje cijelog tijela itd.

#### 4.4. Monolitni kompozit

Monolitni kompozit je zapravo kompozit ojačan vlaknima, a koristi se za visoko opterećene dijelove u avio industriji. Monolitne kompozite čine više zajedno povezanih slojeva. Vlakna

koja su usmjerena u jednom smjeru pod određenim kutom nazivaju se jedno-usmjerenim vlaknima te povezana s matricom čine jedan sloj kompozita. Različitom orijentacijom tih slojeva nastaje monolitna kompozitna konstrukcija kao što se može vidjeti na Slici 43.



**Slika 43. Monolitni kompozit s različitom orijentacijom slojeva [13]**

U ovome radu od monolitnog kompozita je napravljena podnica helikoptera *Westland 30* čija će svojstva biti uspoređena sa *sandwich* podnicom opisanom ranije.

Podnica je dimenzija 2250 x 1300 mm<sup>2</sup>, napravljena direktno u programskom paketu *Abaqus* kao *2D Shell Planar* model. Spojena je i opterećena identično kao *sandwich* podnica; direktno na površinu jednodijelne aluminijske konstrukcije poda helikoptera. Opterećena je gravitacijom, brzinom od 8m/s te joj je omogućen pad samo u vertikalnom smjeru prema analitičkoj površini koja simulira tlo. Pošto je već prethodno zaključeno da simulacija krutom pločom nije realan prikaz opterećenja, kod monolitne podnice biti će korištena samo konstrukcija sa sjedalima opisana u prethodnom poglavlju.

Materijal monolitne kompozitne podnice isti je kao vanjski slojevi *sandwich* podnice; *GFRP* staklena vlakna ojačana epoksidnom smolom čija se svojstva nalaze u Tablici 4. Zadana su dva različita slučaja orijentacije slojeva tj. dvije simulacije koji iznose:

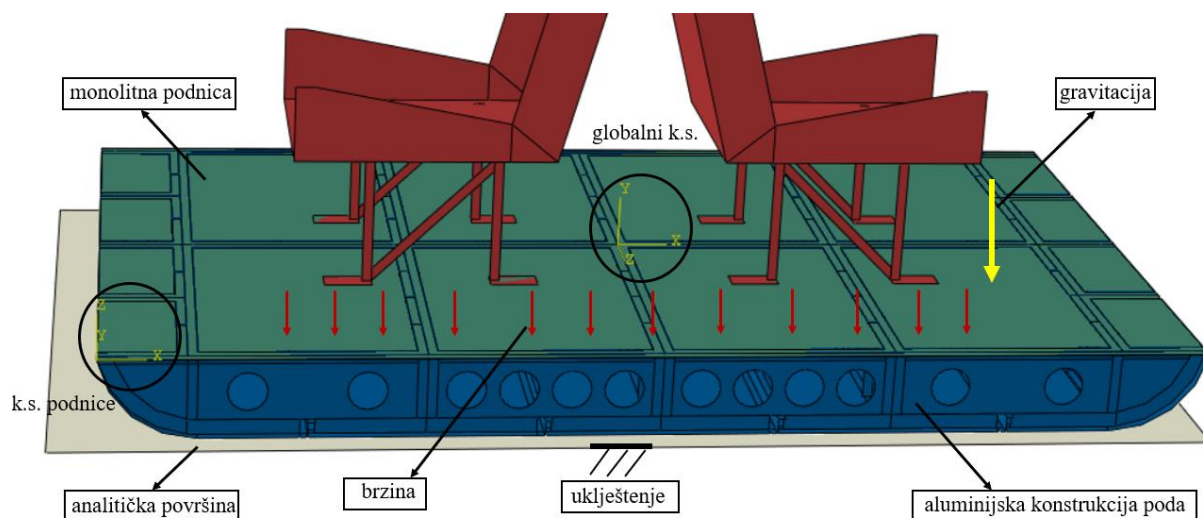
$$[0/90/0/90/0/90/0/90/0/90/0/90/0/90/0/90/0/90]_s \quad (46)$$

za prvu simulaciju, te:

$$[45/0/-45/90/-45/0/45/-45/90/-45/0/0/45/45/0/0/-45/90/-45/0]_s \quad (47)$$

za drugu.

Obje orijentacije sastoje se od 40 simetričnih slojeva oko središnje površine. Debljina sloja je u oba slučaja 0,25 mm što za obje simulacije iznosi podnicu debljine 10 mm. Glavni materijalni koordinatni sustav zadan je u oba slučaja isto kao kod *sandwich* podnice.



**Slika 44. Monolitna podnica s ostatkom konstrukcije poda helikoptera**

Na Slici 44 prikazan je položaj monolitne podnice u odnosu na ostale komponente modela simulacije, opterećenja, rubni uvjeti te koordinatni sustavi.

Podnica je diskretizirana s 14973 ljuskastih S4R elemenata te 15228 čvorova.

## 5. Rezultati

### 5.1. Validacija numeričkog modela

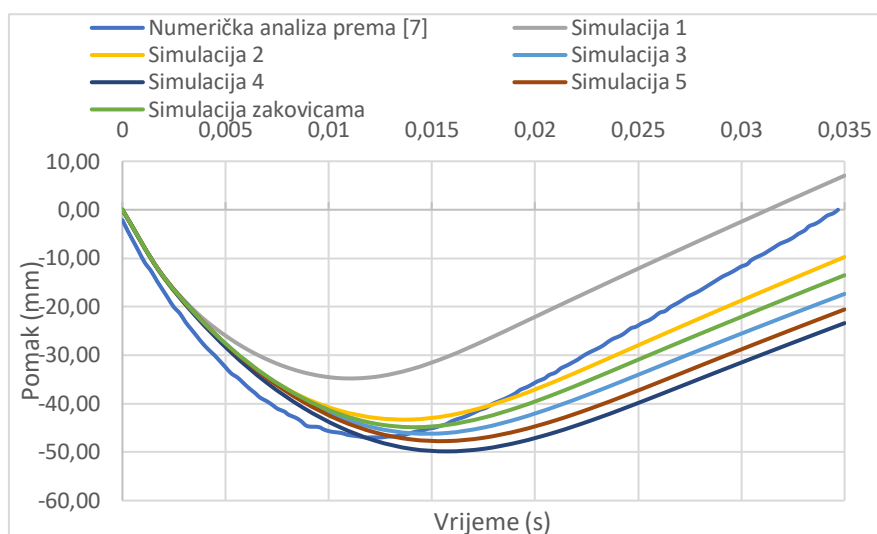
U ovom poglavlju biti će riječ o rezultatima dobivenima za numeričku simulaciju pada aluminijskog poda te aluminijskog poda spojenog zakovicama. Kako bi se mogla napraviti usporedba između tih dviju simulacija, prvo je potrebno provesti validaciju numeričkih modela usporedbom s eksperimentalnim rezultatima iz [4].

Tablica 7 prikazuje pet simulacija jednodijelne aluminijske konstrukcije poda s nekoliko preinaka kao što su gustoća mreže u svrhu konvergencije rješenja te simulaciju aluminijske konstrukcije spojene zakovicama.

**Tablica 7. Parametri simulacija**

|                                                       | Simulacija<br>1 | Simulacija<br>2 | Simulacija<br>3 | Simulacija<br>4                       | Simulacija<br>5                 | Simulacija<br>zakovicama        |
|-------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Prosječna<br>veličina<br>konačnog<br>elementa<br>[mm] | 20              | 15              | 12              | 12 i 10 na<br>kritičnim<br>područjima | 12 i 10 s<br>faktorom<br>trenja | 12 i 10 s<br>faktorom<br>trenja |
| Broj S4R<br>elemenata                                 | 15965           | 26734           | 43158           | 45895                                 | 45895                           | 44078                           |
| Broj S3<br>elemenata                                  | 379             | 578             | 595             | 237                                   | 237                             | 590                             |
| Broj<br>čvorova                                       | 16866           | 28011           | 44714           | 47420                                 | 47420                           | 46070                           |

Ove simulacije uspoređuju se s rezultatima numeričke analize iz [7] te je to vidljivo na dijagramu pomak – vrijeme prikazanom na Slici 45 koji označava pomak krute ploče u vertikalnom smjeru od trenutka pada do trenutka odskoka u proizvoljnoj točki odabranoj na središtu krute ploče. Vrijeme simulacije iznosi 35 ms realnog vremena kako bi se smanjilo vrijeme trajanja analize, a što je dovoljno za procjenu oštećenja podnice nakon udara. Vrijeme trajanja analize na računalu s dvojezgrenom Intel i5 procesorom od 2,3 GHz i 8GB radne memorije iznosi oko 4 sata.



**Slika 45. Dijagram pomak-vrijeme**

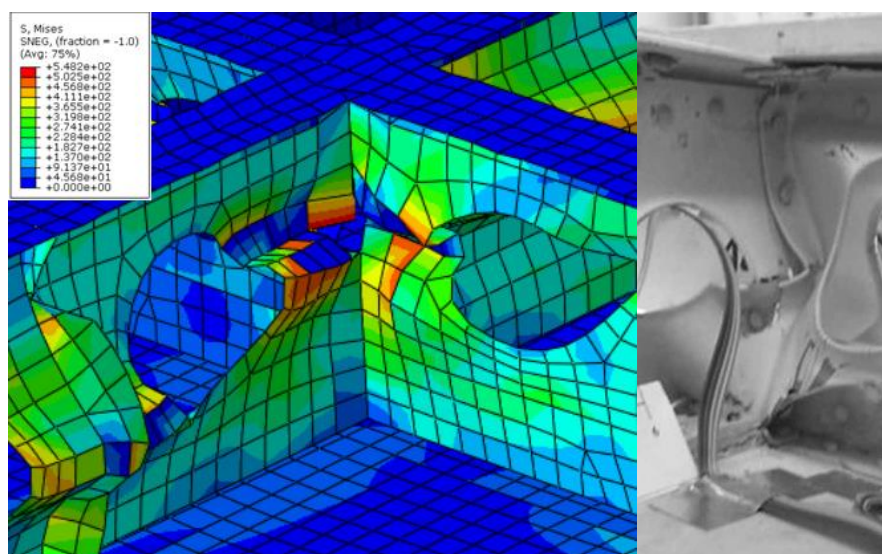
Iz dijagrama je vidljivo kako se povećanjem broja elemenata polako približava podacima numeričke analize iz [7] tj. da je Simulacija 5 najprihvatljivija za daljnju analizu.

Također je jasno vidljiva razlika u krutosti između podataka preuzetih iz [7] te simulacija dobivenih u programskom paketu *Abaqus*. Razlog tome je što u literaturi nisu u potpunosti dani podaci koji bi omogućili izradu numeričkog modela. Sukladno tome, postoji i razlika u masama modela konstrukcije, masa numeričke simulacije iz [7] iznosila je 31 kg, a masa modela Simulacije 5 19,5 kg. Promjena mase aluminijske konstrukcije poda (tj. povećanjem debljine presjeka određenih dijelova konstrukcije) nije znatno utjecala na krutost te je time zanemarena. Simulacija zakovicama u odnosu na Simulaciju 5 pokazuje veći odskok na kraju simulacije.

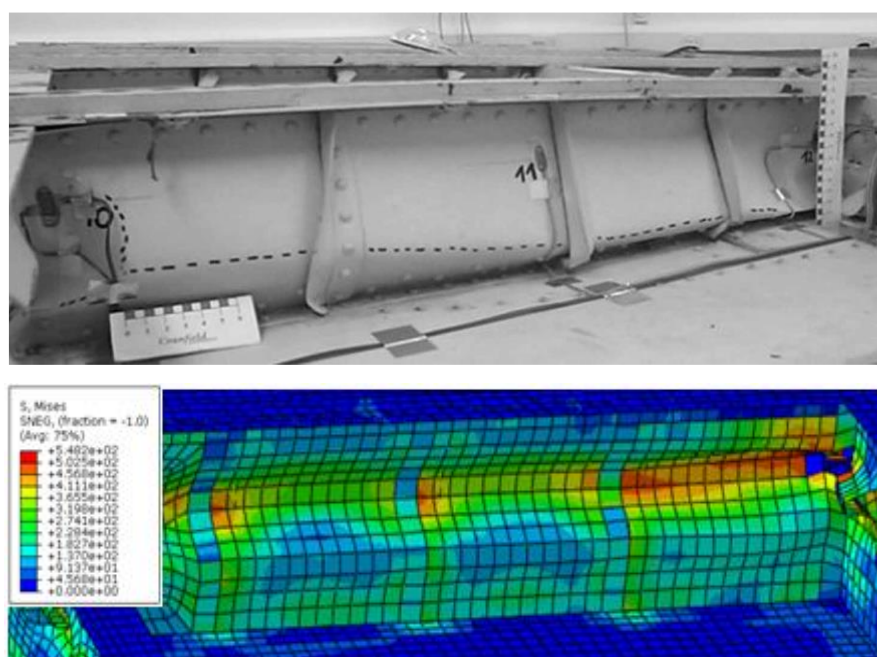
### 5.1.1. Raspodjela naprezanja

Na Slikama 46 i 47 je prikazana usporedba deformiranog oblika s raspodjelom naprezanja dobivenog numeričkom analizom jednodijelne aluminijske konstrukcije (Simulacije 5) i prikaza dijela konstrukcije poda iz eksperimenta [4]. Slika 46 je prikaz spoja poprečnog okvira V0 i uzdužnog STN1080F u središtu konstrukcije. Slika 47 prikazuje okvir V0 koji ne sadrži provrte te raspodjelu naprezanja na okviru po *Von Misesu* i stupanj deformacije nakon eksperimenta. Uz slike numeričke simulacije prikazana je legenda raspodjele naprezanja u MPa.

Također će kasnije biti prikazana raspodjela naprezanja za cijelu jednodijelnu konstrukciju poda te konstrukciju zakovicama.



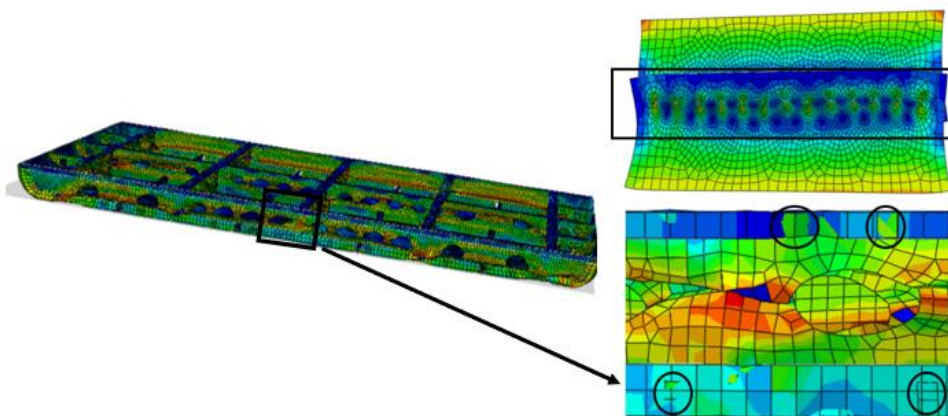
**Slika 46. Usporedba deformiranog oblika i raspodjela naprezanja po Von Misesu na kraju numeričke analize i stvarnog prikaza spoja okvira V0 i STN1080F prema [4] [MPa]**



**Slika 47. Usporedba deformiranog oblika i raspodjela naprezanja po Von Misesu okvira V0 u stvarnom prikazu prema [4] i na kraju numeričke simulacije [MPa]**

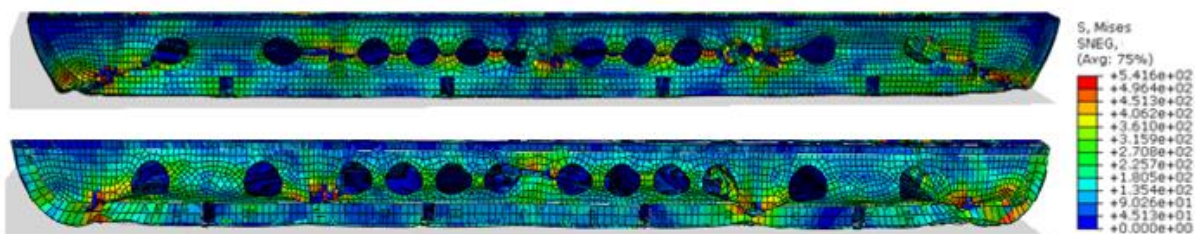
Prethodne slike pokazuju podudaranje deformiranog oblika okvira numeričke analize s rezultatima eksperimenta. Također je na slikama vidljivo da se na spojevima između okvira i okvira i oplata javljaju najveća naprezanja te kod nekih dijelova dolazi do pucanja i odvajanja okvira.

Slika 48 prikazuje karakterističnu pojavu raspodjele naprezanja kod simulacije zakovičnog spoja (gore) te simulaciju zakovičnog spoja poda helikoptera s ukrutama (dolje).



**Slika 48. Koncentracija naprezanja zakovičnog spoja**

Karakteristična koncentracija naprezanja oko zakovičnog spoja nije značajno uočljiva u aluminijskom modelu poda spojenom zakovicama zbog prirode sila kojima su opterećene tj. na Slici 48 (gore) isključivo se radi o smičnom opterećenju zakovica dok je na Slici 48 (dolje) riječ o dinamičkoj simulaciji udara u tlo gdje se ne javlja isključivo samo smično naprezanja te iz tog razloga karakteristična koncentracija naprezanja za zakovice nije toliko izražena.

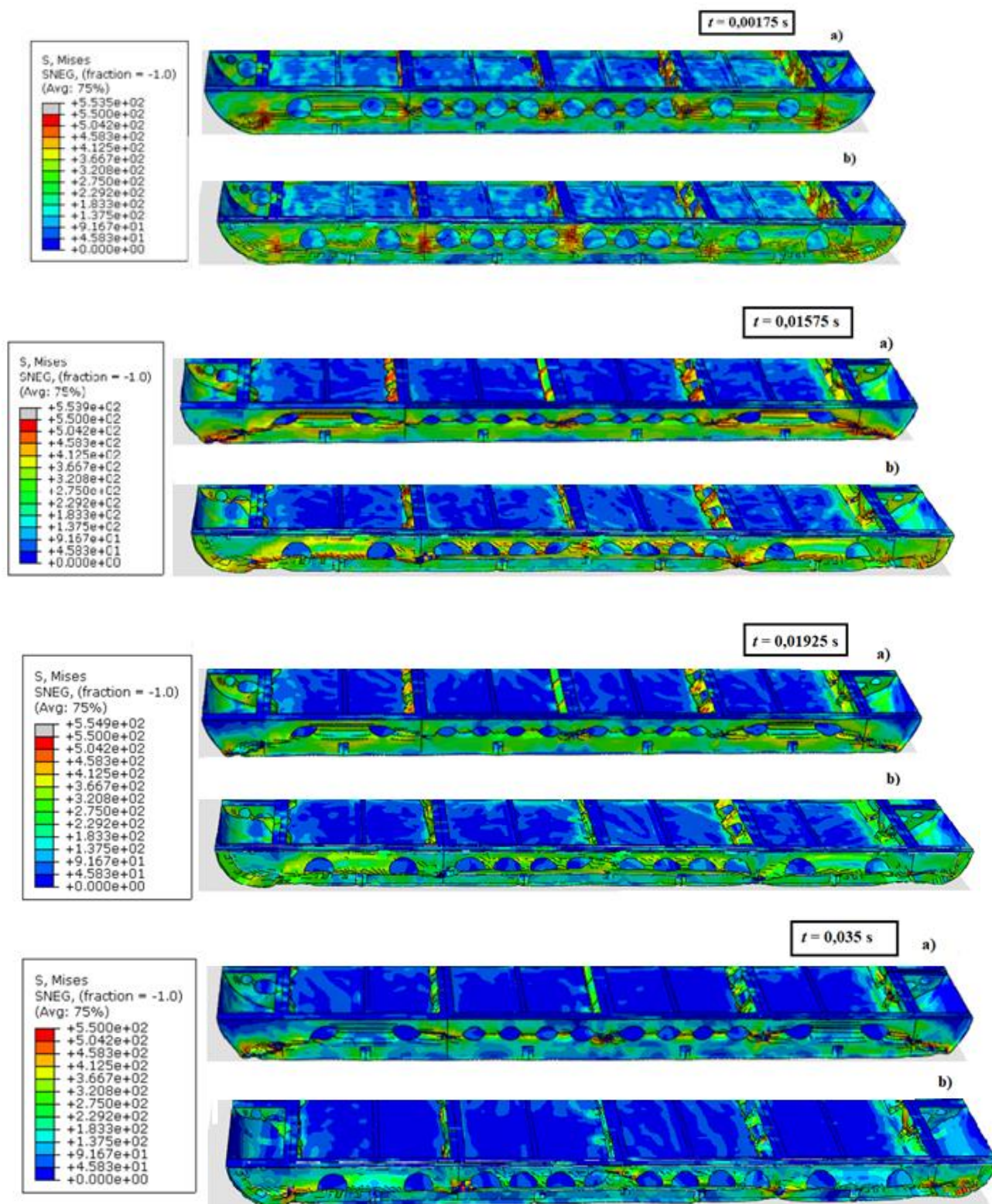


**Slika 49. Usporedba raspodjele naprezanja po Von Misesu okvira STN450F jednodijelnog aluminijskog (gore) te spojenog zakovicama (dolje) na kraju simulacije [MPa]**

Slikom 49 prikazana je raspodjela naprezanja na okviru STN450F koji je odabran za spajanje zakovicama jer je tamo eksperimentalno dobiven najveći stupanj deformacije okvira prema [4]. Ovakvim prikazom mogu se vidjeti manja naprezanja kod simulacije zakovicama na mjestima većih koncentracija naprezanja.

Na Slici 50 prikazana je usporedba raspodjele naprezanja po Von Misesu jednodijelne aluminijske konstrukcije poda (označeno a) te spojene zakovicama (b) u četiri vremenska perioda, od trenutka početka pada do trenutka odskoka tj. kraja simulacije. Prva slika predstavlja vremenski period od 0,00175 s, tj. trenutak udara konstrukcije u tlo. Druga slika prikaz je trenutka maksimalnog pomaka konstrukcije poda. Sljedeća slika je početak odskoka

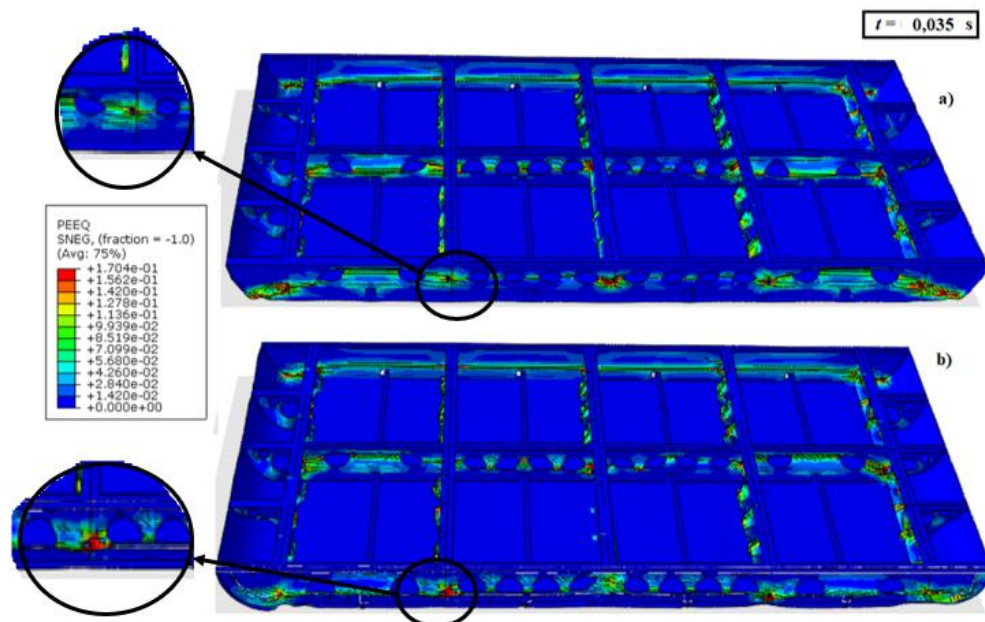
konstrukcije. Na toj slici može se uočiti manje koncentracije naprezanja te početak rasterećenja konstrukcije. Zadnja slika predstavlja kraj simulacije, gdje je vidljiv ostatak trajnih deformacija na oslabljenim dijelovima konstrukcije.



**Slika 50. Raspodjela naprezanja po Von Misesu jednodijelne konstrukcije (a) i spojene zakovicama (b) u četiri vremenska perioda [MPa]**

### 5.1.2. Plastične deformacije

Na zonama visoke koncentracije naprezanja počinju se javljati nepovratne tj. plastične deformacije. Na Slici 51 prikazana je raspodjela ekvivalentnih plastičnih deformacija na kraju simulacije.



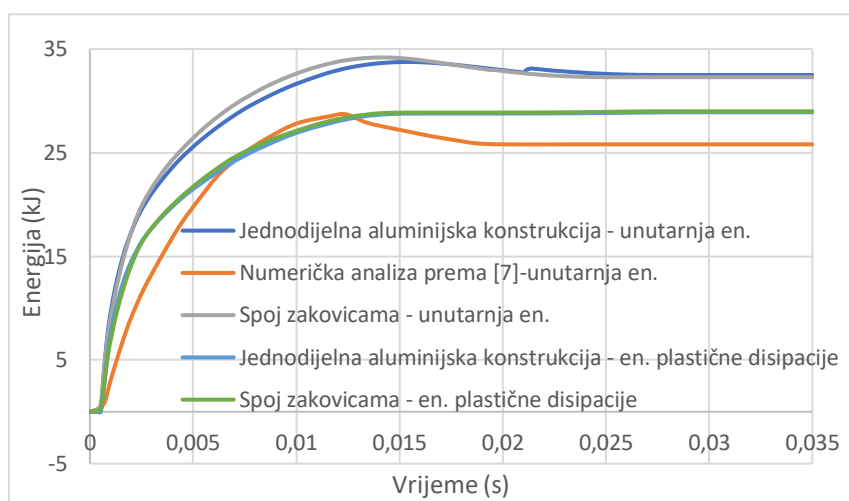
**Slika 51. Usporedba ekvivalentnih plastičnih deformacija između jednodijelne aluminijske konstrukcije (a) i konstrukcije spojene zakovicama (b)**

Iz rezultata prikazanih Slikom 51 je uočljivo kako se na dijelu zakovičnog spoja ukruta s okvirom STN450F stvara manja zona plastifikacije nego na jednodijelnoj konstrukciji. Također se u obje konstrukcije na mjestu spojeva okvira, ukruta te na nekim mjestima kod otvora redukcije mase javlja plastična deformacija. Nakon pojave plastične deformacije gubi se daljnja mogućnost dobre apsorpcije energije te se element kada pređe 17% ekvivalentne plastične deformacije briše.

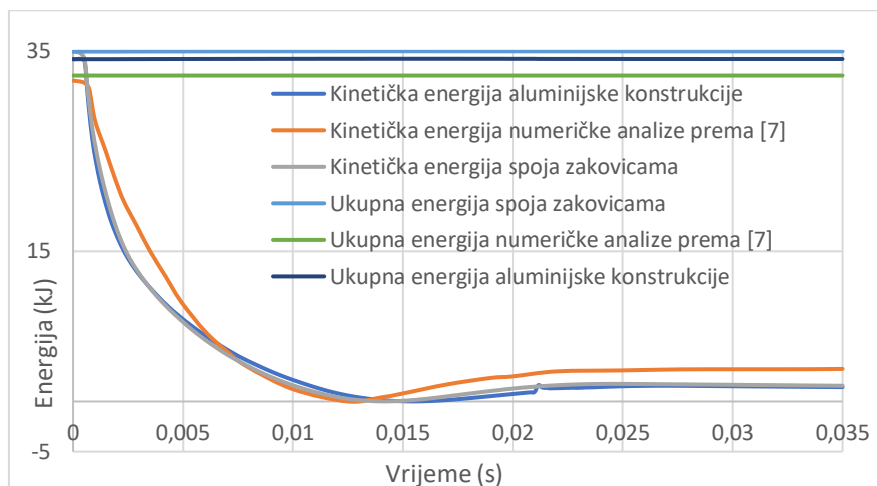
### 5.1.3. Dijagrami energija, brzina i akceleracija

Na Slikama 52 – 55 biti će prikazani dijagrami usporedbe rezultata prema [7], jednodijelne aluminijske konstrukcije te aluminijske konstrukcije spojene zakovicama.

Slike 52 i 53 prikazuju dijagrame promjene energije tokom vremena simulacije pada i udara konstrukcije u tlo.



**Slika 52. Usporedba promjene unutarnje energije i energije plastične disipacije tokom vremena simulacije**

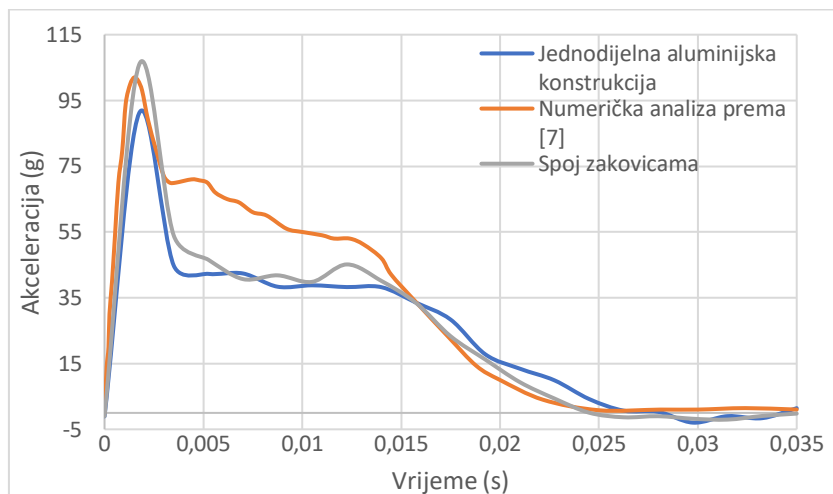


**Slika 53. Usporedba promjene ukupne i kinetičke energije tokom vremena simulacije**

U oba dijagrama vidljivo je dobro poklapanje rezultata s numeričkom analizom iz [7]. Kod promjene unutarnje energije javlja se viša razina energije kod jednodijelne aluminijske simulacije i simulacije zakovicama, što znači da se veći dio početne ukupne energije pretvorio u druge energije. Krivulja energije plastične disipacije simulacije zakovicama i jednodijelne aluminijske se preklapaju. Krivulja kinetičke energije dobro opisuje ponašanje modela tokom simulacije, nagli pad konstrukcije, udar u tlo te naknadni odziv konstrukcije. Dijagram ukupne energije ostaje konstantan što upućuje na stabilnost numeričke simulacije.

Uzrok minimalne razlike između krivulja jednodijelne aluminijske konstrukcije i konstrukcije spojene zakovicama je što su simulacije u globalu iste osim u dijelu okvira STN450F gdje su ukrute spojene zakovicama kod druge simulacije, a razlika u odnosu na simulaciju iz [7] nastaje zbog različitih masa modela.

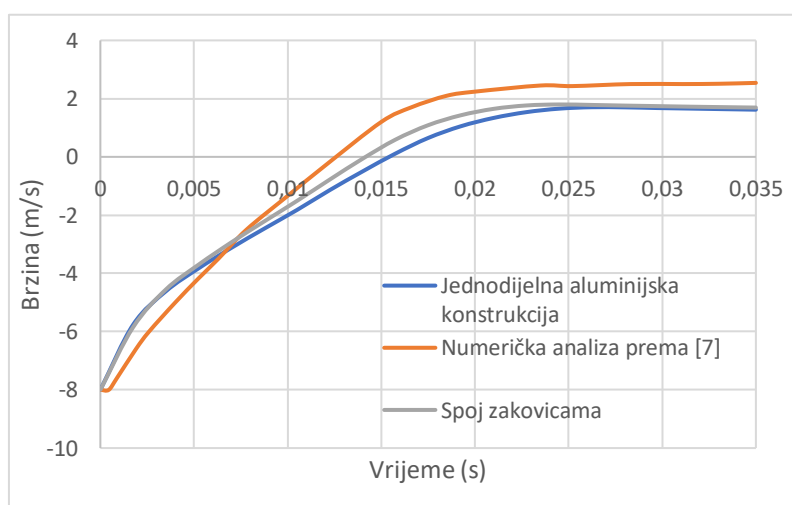
Na Slikama 54 i 55 prikazani su dijagrami promjene akceleracije i brzine u vremenu pada i udara konstrukcije poda u tlo.



**Slika 54. Usporedba akceleracije tokom vremena simulacije na krutoj ploči**

Čvor numeričkog modela čiji su se rezultati koristili za usporedbu s analizom iz [7] uzeti su na središtu krute ploče kako bi bili u skladu s podacima simulacije iz [7].

Rezultati dijagrama na Slici 54 prikazuju da se maksimalna vrijednost akceleracije nalazi između 80 i 101 g. Nakon te točke akceleracija kontinuirano pada. Ako se uzmu u obzir *Eiband* krivulje objašnjene u uvodu, kratkotrajni impuls velikog opterećenja nije opasan za ljudski organizam. Teške ozljede se mogu javiti dugotrajnijem konstantnom izlaganju akceleracije od 50 g. Vršna vrijednost akceleracije događa se između 2 i 3 ms što odgovara trenutku udara konstrukcije u tlo. Pošto su vršne vrijednosti u dijagramu iznad 50 g bitno je dobro projektirati i podnicu koja mogu dodatno ublažiti te sile.

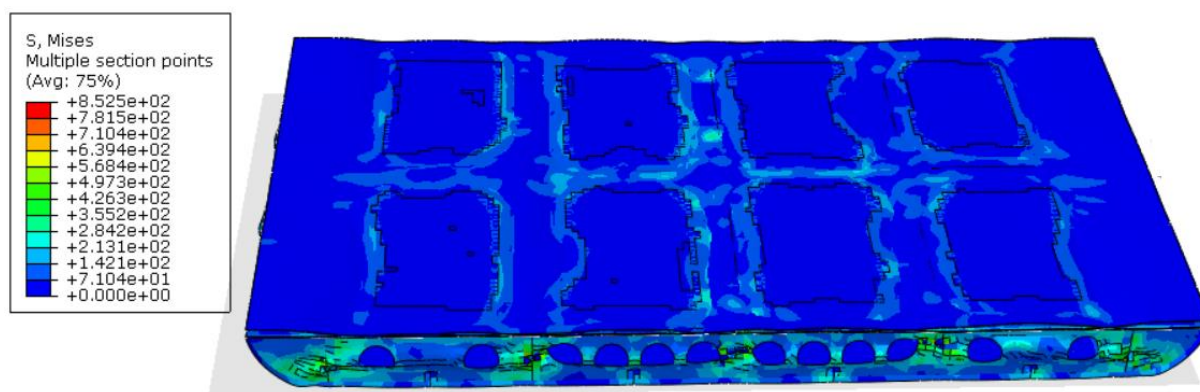


**Slika 55. Usporedba brzine tokom vremena simulacije na krutoj ploči**

Slika 55 prikazuje promjenu brzine tokom simulacije mjerenu u središtu krute ploče. Brzina odgovara početnoj zadanoj brzini od 8 m/s koja nakon udara u tlo i odskoka kreće usporavati djelovanjem gravitacije. Kada bi se produžilo vrijeme simulacije, mogao bi se vidjeti ponovni pad konstrukcije na tlo.

## 5.2. Usporedba rezultata kompozitnih podnica helikoptera

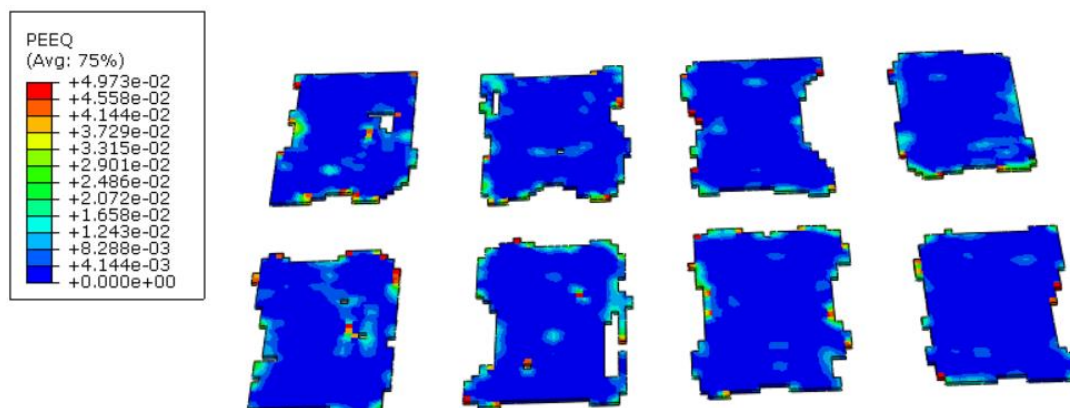
Na Slici 56 prikazana je raspodjela naprezanja poda i podnice od *sandwich* kompozita helikoptera *Westland WG30* opterećena po cijeloj površini krutom pločom koja predstavlja masu ostatka konstrukcije helikoptera (961 kg).



**Slika 56. Raspodjela naprezanja po Von Misesu sandwich podnice opterećene krutom pločom na kraju simulacije [MPa]**

Na slici se može vidjeti kako se dio podnice odvaja od konstrukcije poda te kako je na određenim dijelovima deformirana toliko da prati konturu okvira konstrukcije poda.

Modelu jezgre *Nomexa* dodan je kriterij posmičnog popuštanja *shear failure* u iznosu od 85% ekvivalentne plastične deformacije, tj. kada materijal jezgre dostigne plastičnu deformaciju od 85% element se briše iz mreže konačnih elemenata. Slika 57 prikazuje plastičnu deformaciju jezgre *sandwich* podnice opterećenu krutom pločom.



**Slika 57. Plastična deformacija jezgre od Nomexa opterećena krutom pločom**

Uzeći u obzir broj izbrisanih elemenata vidljivo je da se na više mjesta javlja plastična deformacija te time takav model nije uporabljiv (zbog nerealnog opterećenja podnice po cijeloj površini). Na dalje, koristi će se model konstrukcije sa sjedalima.

Sljedeće će biti prikazana usporedba *sandwich* kompozitne podnice s dvije monolitne podnice različite orijentacije slojeva te tri *sandwich* kompozitne podnice različitih debljina jezgre.

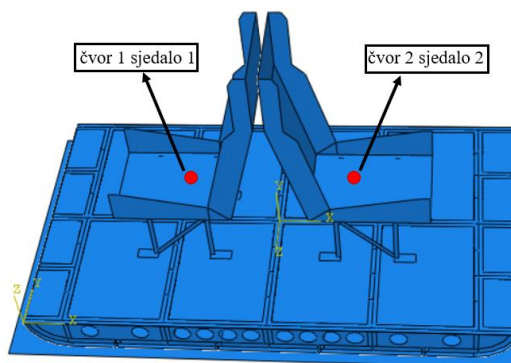
### 5.2.1. Usporedba sandwich kompozitne i monolitne podnice

**Tablica 8. Parametri simulacija podnice**

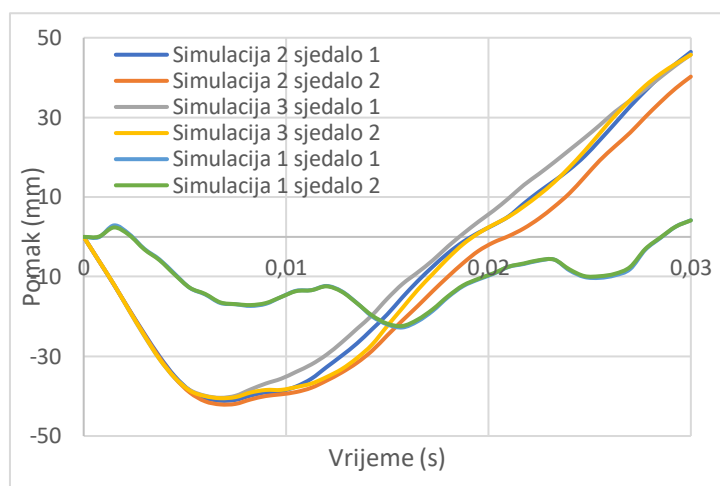
|                 | Simulacija 1                                                           | Simulacija 2                                                                 | Simulacija 3                                                                 |
|-----------------|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Svojstva        | -sandwich kompozit<br>-Nomex jezgra<br>-GFRP/epoksi<br>vanjski slojevi | -monolitni kompozit<br>-GFRP/epoksi<br>-orijentacija prema<br>jednadžbi (46) | -monolitni kompozit<br>-GFRP/epoksi<br>-orijentacija prema<br>jednadžbi (47) |
| Vrsta elemenata | C3D8R, SC8R                                                            | S4R                                                                          | S4R                                                                          |
| Broj elemenata  | 39150                                                                  | 14973                                                                        | 14973                                                                        |
| Broj čvorova    | 53152                                                                  | 15228                                                                        | 15228                                                                        |

U Tablici 8 prikazani su parametri simulacija kompozitnih podnica koje će biti uspoređene u nastavku.

Slika 58 prikazuje čvorove sjedala 1 i 2 na kojima su mjerene vrijednosti rezultata za pomak, brzinu i akceleraciju analize. Zbog ne potpune simetričnosti kako konstrukcije tako i položaja sjedala na podnici mjereni su rezultati za oba sjedala.



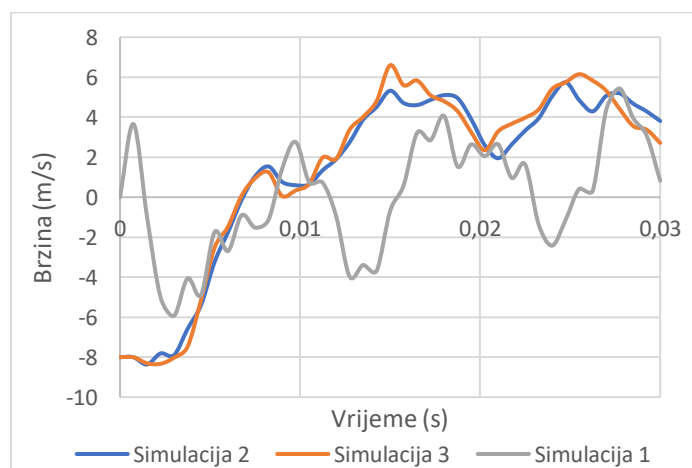
**Slika 58. Položaj mjerenja rezultata za brzinu, akceleraciju i pomak u analizi na sjedalima**  
Rezultati pomaka u tim čvorovima vidljivi su u dijagramu pomak – vrijeme na Slici 59.



**Slika 59. Dijagram pomak – vrijeme za kompozitne podnice**

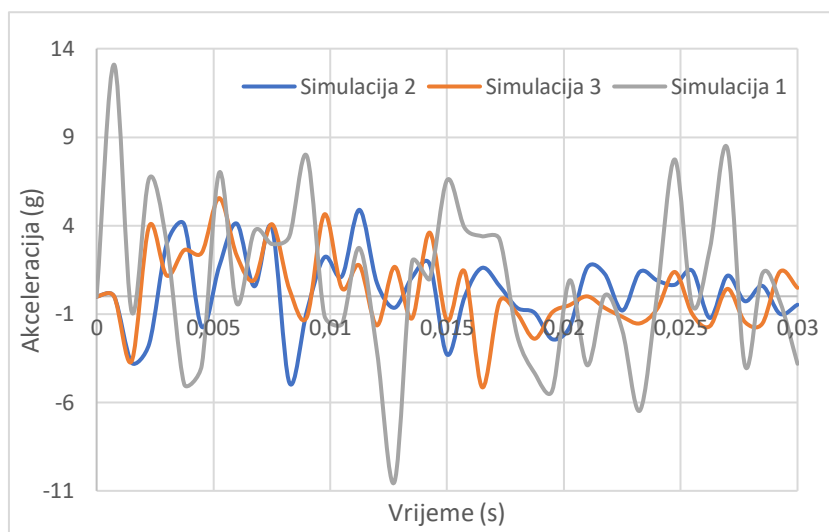
Iz ovog dijagrama je vidljivo da nema velikih razlika između rezultata mjerenih na sjedalu 1 i sjedalu 2 (kod Simulacije 1 se rezultati preklapaju) te će se zbog pojednostavljenja prikaza rezultata uzimati sa čvora 2. Na slici je vidljiva velika razlika u odzivu konstrukcije, dok kod monolitne konstrukcije pomak završava između 40 i 50 mm, kod *sandwich* je riječ o svega nekoliko milimetara. Kod *sandwich* podnice dolazi do oscilacije sjedala jedno prema drugom uzrokovanih podizanjem rubova podnice od konstrukcije poda što je razlog izgledu krivulje Simulacije 1.

Slika 60 predstavlja usporedbu brzine gdje se kod *sandwich* podnice vidi turbulentnija putanja.



**Slika 60. Usporedba vertikalne komponente brzine monolitne i *sandwich* podnice tokom vremena simulacije na sjedalu 2**

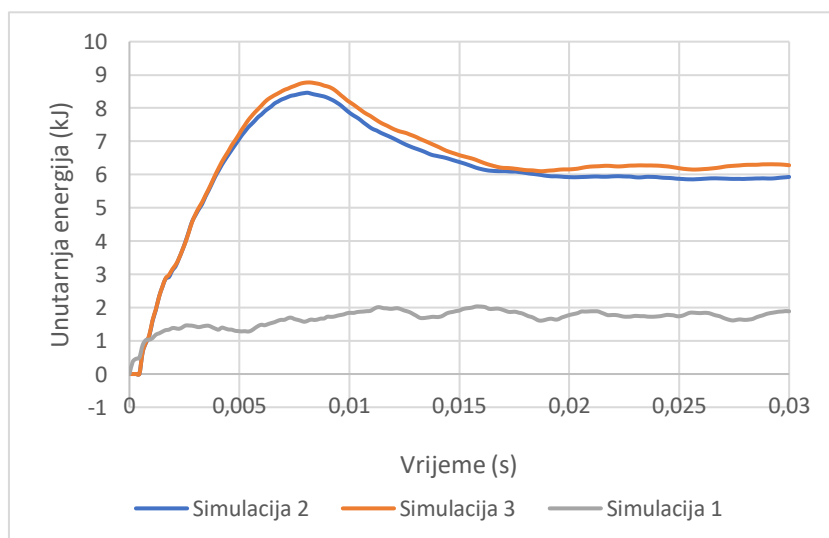
Također je bitno napomenuti razliku u masi monolitne podnice koja iznosi 58,5 kg te *sandwich* podnice 12,5 kg. Monolitna podnica modelirana je velikim brojem slojeva (40) što je čini krutom i masivnom konstrukcijom.



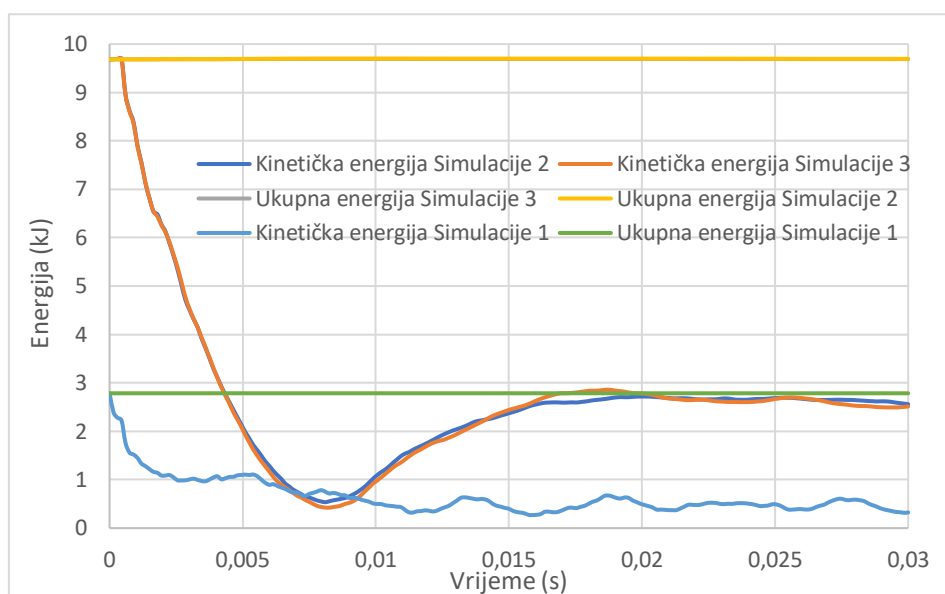
**Slika 61. Usporedba vertikalne komponente akceleracije monolitne i *sandwich* podnice tokom vremena simulacije na sjedalu**

Na Slici 61 prikazana je akceleracija mjerena u sjedalu tokom vremena simulacije (30 ms). Vrijeme simulacije skraćeno je sa 35 ms na 30 zbog jako dugog trajanja simulacije. Iz dijagrama je vidljivo kako se javlja veća akceleracija kod simulacije *sandwich* podnicom, ali je u sva tri slučaja riječ o kratkotrajnim impulsima relativno niske akceleracije što ne predstavlja opasnost za putnike. Također se za razliku od akceleracija prikazanih Slikom 54 ne javlja jedna istaknuta maksimalna vrijednost akceleracije. Za ispravno tumačenje ovih analiza trebala bi se uzeti u obzir elastičnost samog sjedala koje doprinosi ovim vrijednostima.

Na Slikama 62 i 63 biti će prikazani dijagrami raspodjele kinetičke, ukupne i unutarnje energije u vremenu simulacije.

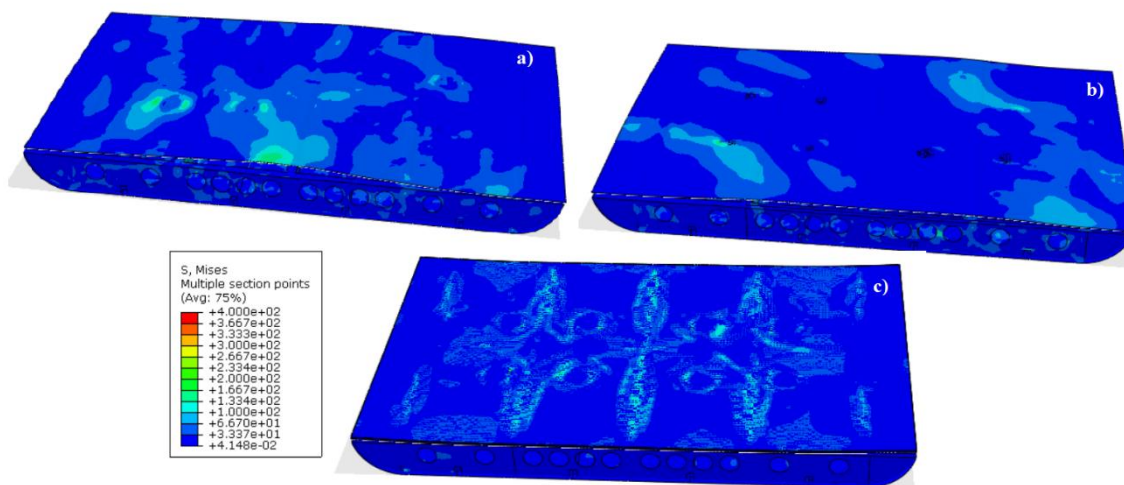


**Slika 62. Dijagram unutarnje energije modela s monolitnom i *sandwich* podnicom**



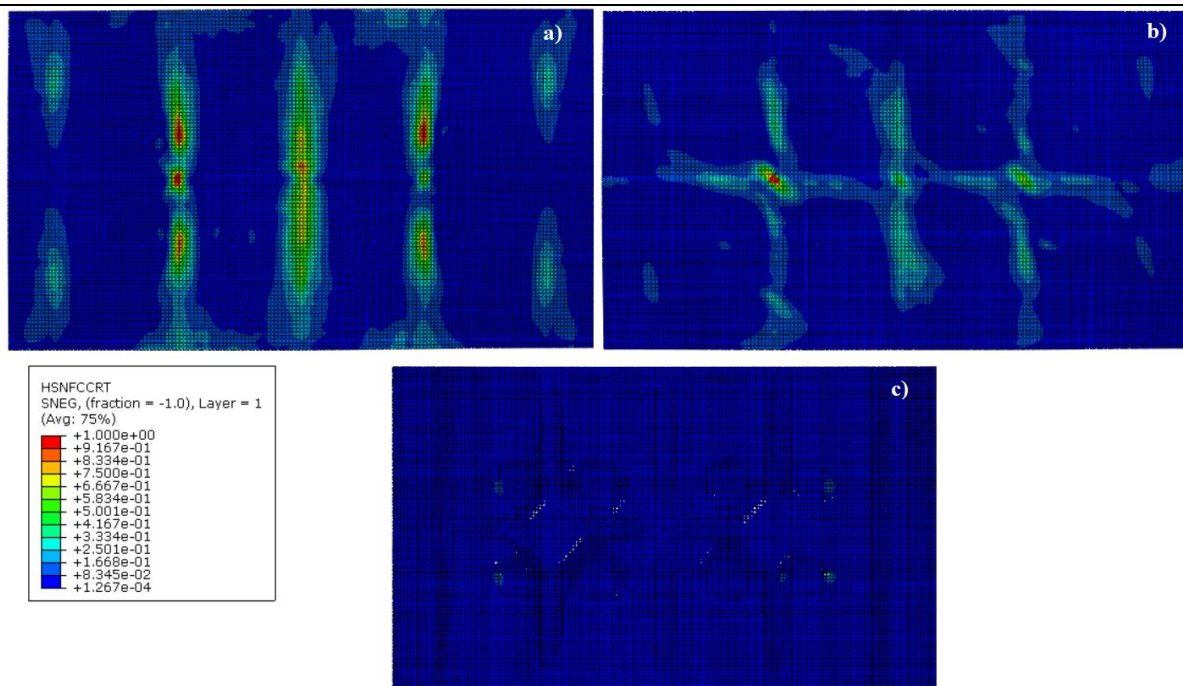
**Slika 63. Dijagram kinetičke i ukupne energije modela s monolitnom i *sandwich* podnicom**

Prema prethodnim dijagramima može se uočiti mnogo nepravilnije krivulje unutarnje i kinetičke energije kod *sandwich* podnice, ali također i znatno niže vrijednosti. Uzrok nepravilnih krivulja vjerojatno je prijenos vibracija na sjedalo nastalih pri udaru konstrukcije. Također se na dijagramima može uočiti razlika u količini energije koja se prenosi na posadu uzrokovana velikom razlikom u masi između monolitne i *sandwich* podnice.



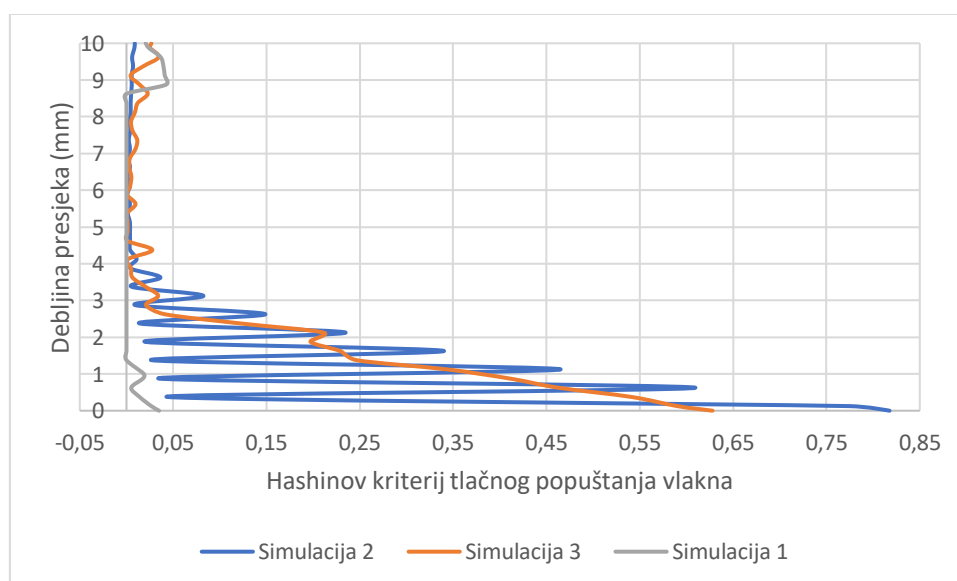
**Slika 64. Raspodjela naprezanja po Von Misesu prvog sloja monolitne (a i b) i *sandwich* (c) podnice na kraju simulacije (30 ms) [MPa]**

Na Slici 64 je prikazana raspodjela naprezanja prema *Von Misesu* u prvom sloju te deformacija podnice na kraju simulacije. Sa slike je vidljivo kako podnica u sva tri slučaja ima dovoljnu čvrstoću tj. da sjedala ne propadaju kroz podnicu.



**Slika 65. Raspodjela Hashinovog kriterija tlačnog popuštanja vlakna**

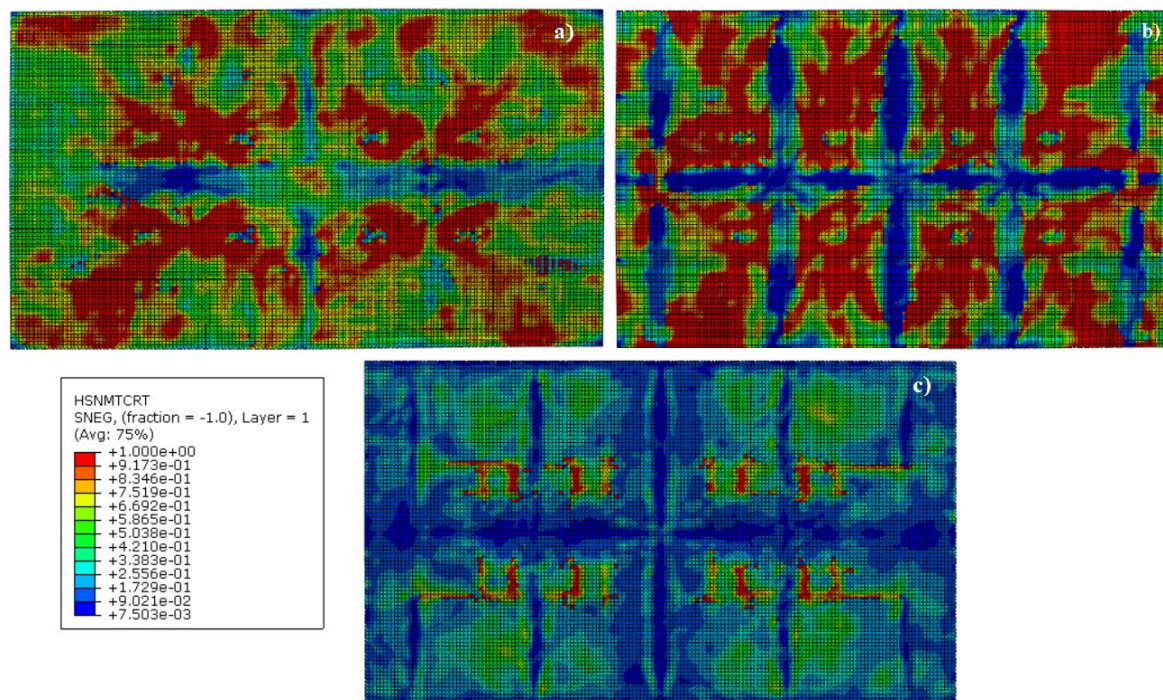
Slika 65 prikazuje raspodjelu Hashinovog kriterija tlačnog popuštanja vlakna. Kriterij se računa za svaki jedno usmjereni sloj, kada dosegne maksimalnu vrijednost jedan znači da je sloj popustio tj. sloj čija vrijednost prva dostigne jedinicu je prvi popustio. Na slici je pod a) označena Simulacija 2, pod b) Simulacija 3, a pod c) vanjski sloj *sandwich* podnice tj. Simulacije 1. Sve tri slike prikazane su za vanjski tj. prvi sloj podnice. Raspodjela Hashinovog kriterija tlačnog popuštanja vlakna po debljini presjeka na sredini podnice može se vidjeti na dijagramu na Slici 66:



**Slika 66. Hashinov kriterij tlačnog popuštanja vlakna po debljini presjeka slojeva**

Kao što je vidljivo na slici i na dijagramu na sredini podnice ne dolazi do popuštanja vlakana niti u jednom sloju tj. vrijednost *Hashinova* kriterija nikada ne dostigne jedan. Za razliku od sredine podnice, vidljivo je na Slici 65 da vlakna popuštaju u nekoliko elementa te da to također ovisi o orijentaciji slojeva.

Za razliku od tlačnog popuštanja vlakna gdje je došlo do popuštanja samo u nekoliko elemenata, na Slici 67 gdje je prikazan *Hashinov* kriterij vlačnog popuštanja matrice javlja se puno veći utjecaj popuštanja.



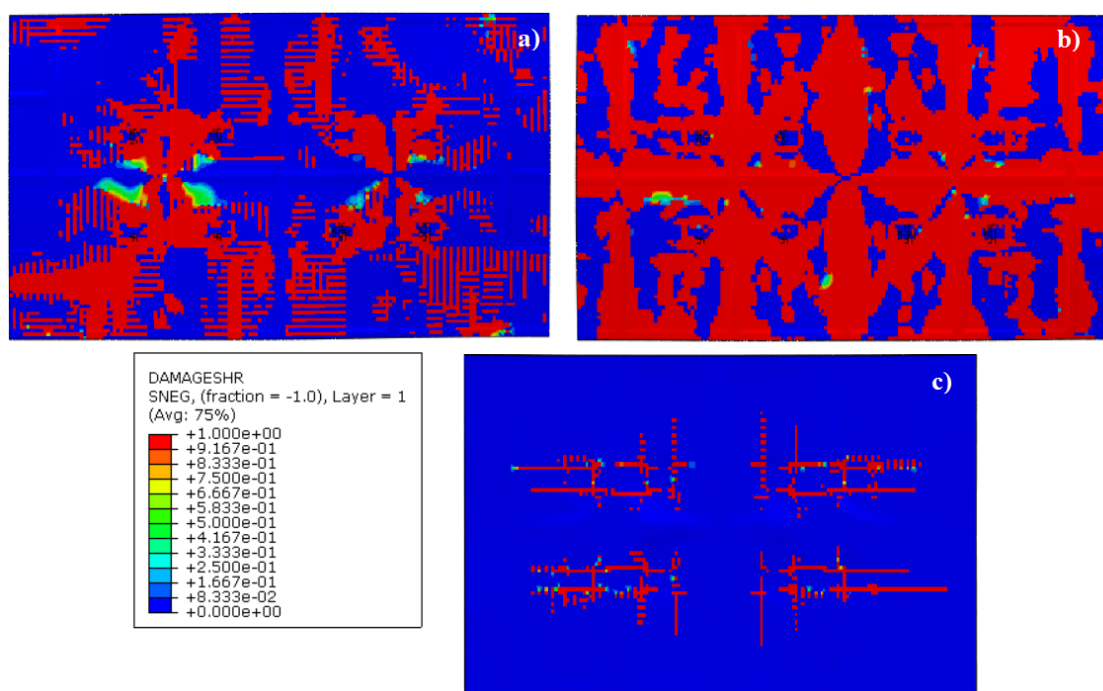
**Slika 67. Raspodjela *Hashinovog* kriterija vlačnog popuštanja matrice**

Također je i na ovoj slici prikazan prvi sloj podnice Simulacije 2 (a), Simulacije 3 (b) te vanjski sloj Simulacije 1 (c). Sa ove slike se može zaključiti kako je matrica podložnija vlačnom popuštanju nego vlakno tlačnom.

Osim tih postoje i *Hashinov* kriterij vlačnog popuštanja vlakna te tlačnog popuštanja matrice čiji rezultati nisu prikazani zbog znatno manjih vrijednosti.

Slika 68 predstavlja energije utrošene na *Hashinov* model oštećenja, što je viša energija više je oštećenja u modelu. Na slici je prikazano posmično popuštanje (*shear*) monolitnih podnica (a i b) te *sandwich* podnice početnog sloja vanjskih slojeva (c).

Crvenom bojom označena su područja gdje je došlo do popuštanja. Vidljiva je velika razlika između monolitnih i *sandwich* podnica te između samih monolitnih (orijentacije slojeva).

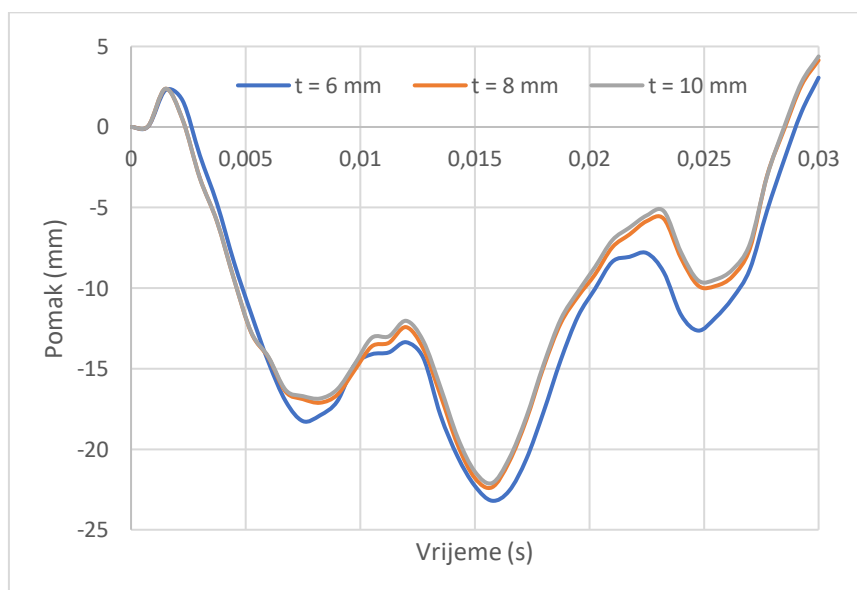


Slika 68. Raspodjela Hashinovog kriterija posmičnog popuštanja

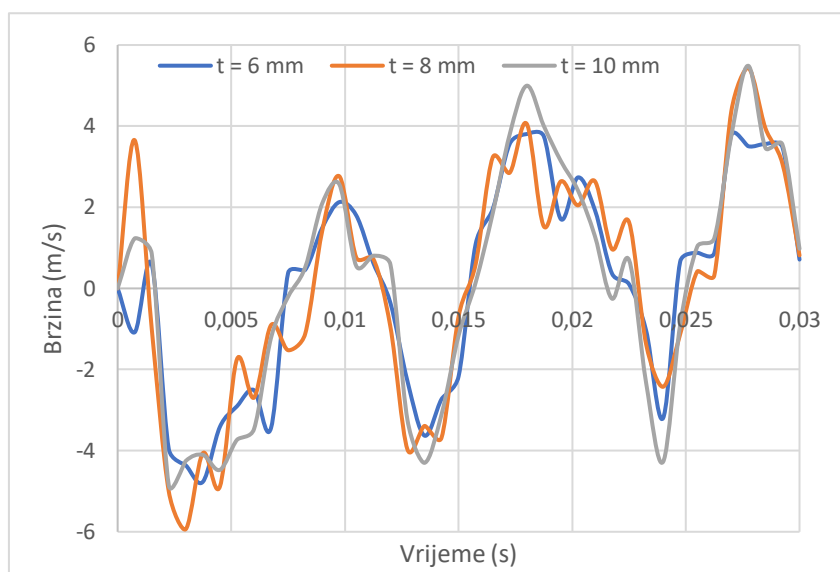
### 5.2.2. Usporedba sandwich kompozitnih podnica različitih debljina jezgri

U ovome poglavlju biti će uspoređene tri simulacije napravljene kao Simulacija 1 u Tablici 8 s različitim debljinama jezgre. Debljine jezgre iznose 6, 8 i 10 mm.

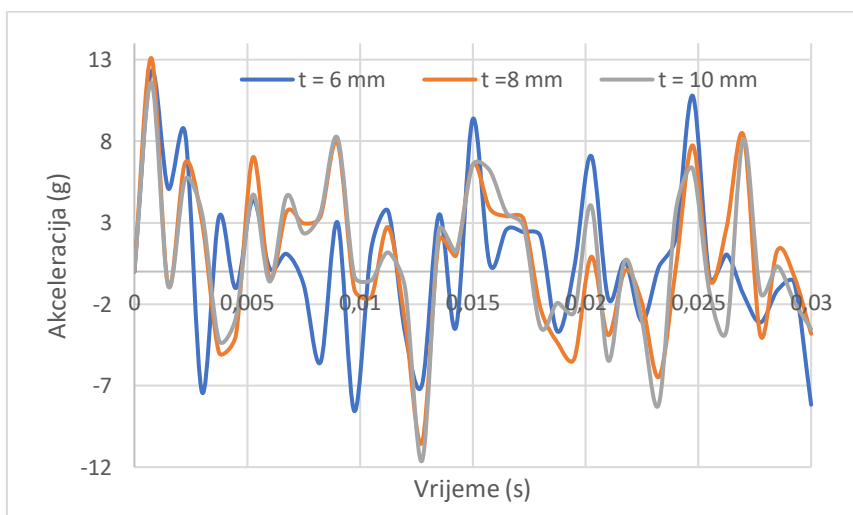
Na Slikama 69, 70 i 71 prikazane su promjene pomaka, brzine i akceleracije u vremenu simulacije za sve tri debljine jezgre.



Slika 69. Dijagram pomaka sandwich podnica različitih debljina jezgre u vremenu



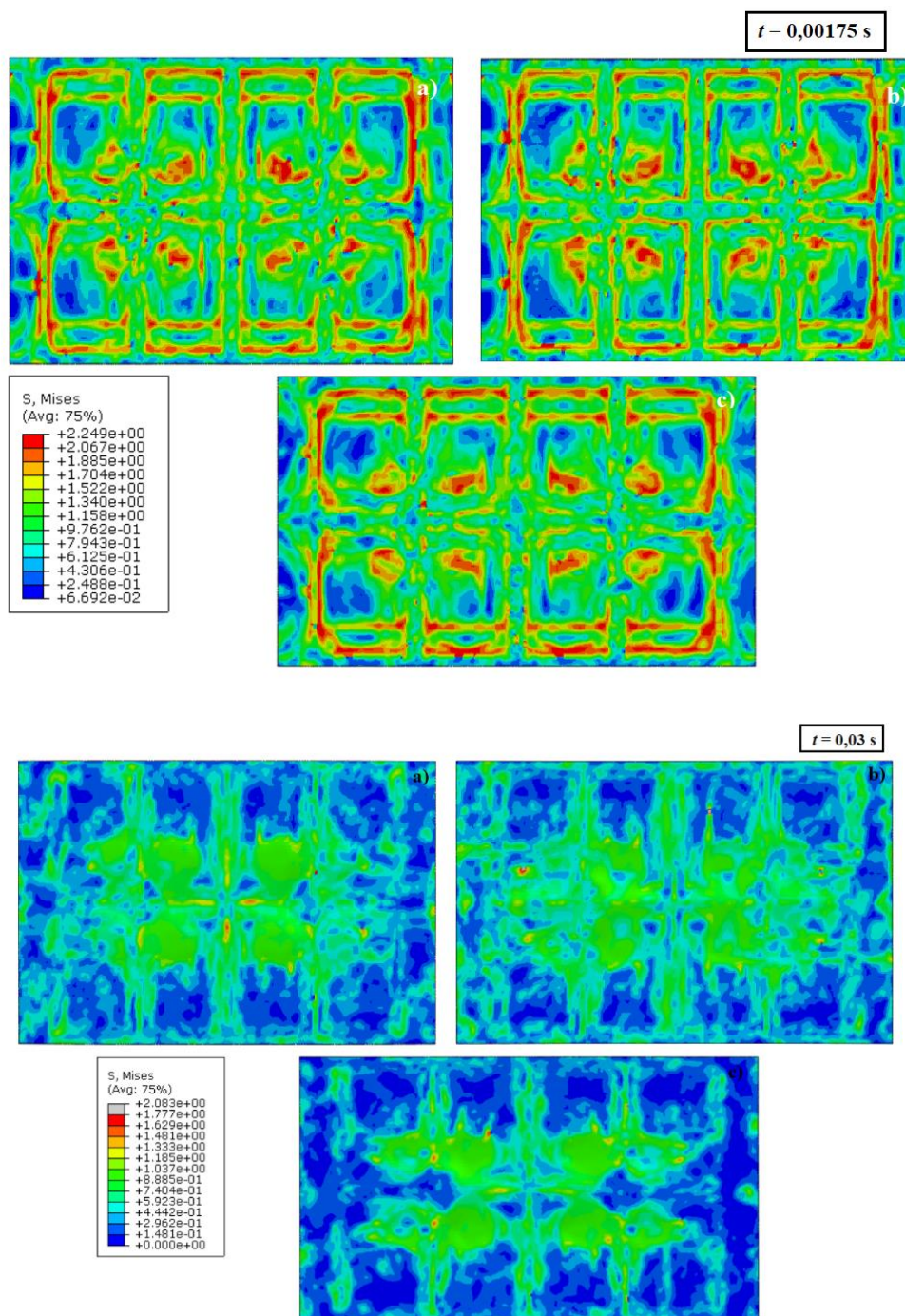
**Slika 70. Brzina sandwich podnica različitih debljina jezgre**



**Slika 71. Akceleracije sandwich podnica različitih debljina jezgre**

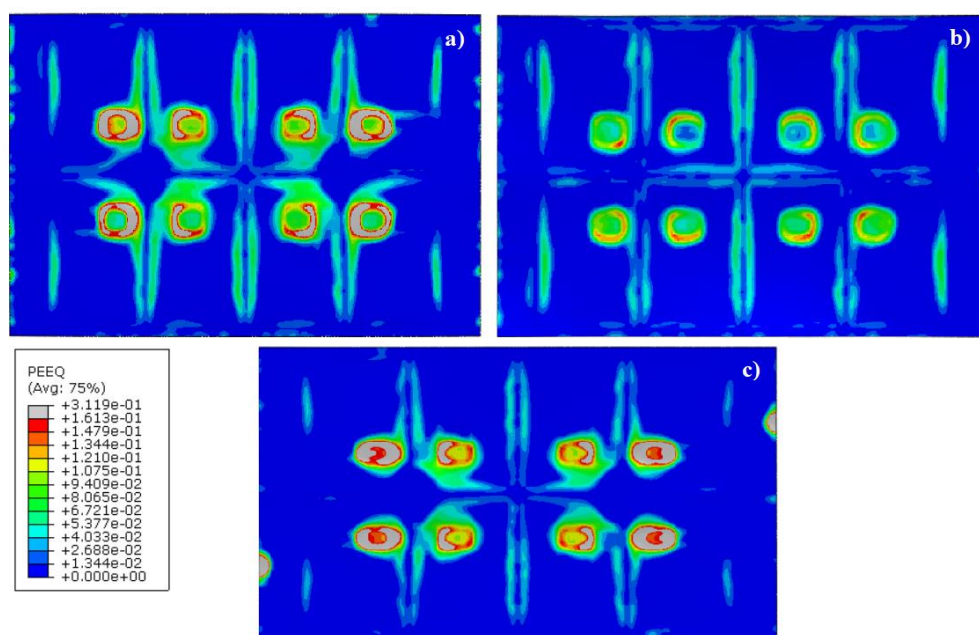
Na prethodno prikazanim dijagramima uočljivo je kako je razlika između simulacija minimalna. Maksimalne vrijednosti u sva tri dijagrama više su s povećanjem debljine jezgre tj. iako su razlike minimalne najviše vrijednosti javljaju se kod debljine jezgre od 10 mm. Turbulentni izgled krivulja vjerojatno je uzrokovan lošom apsorpcijom vibracija podnice i poda.

Budući da je jezgra jedino u čemu se simulacije razlikuju, eventualna razlika u raspodjeli naprezanja najbolje će se vidjeti ako se ista izdvoji. Slika 72 prikazuje raspodjelu naprezanja jezgre u dva vremenska intervala, prvi je u trenutku udara kada se javljaju najveća naprezanja na jezgri te drugi na kraju simulacije.

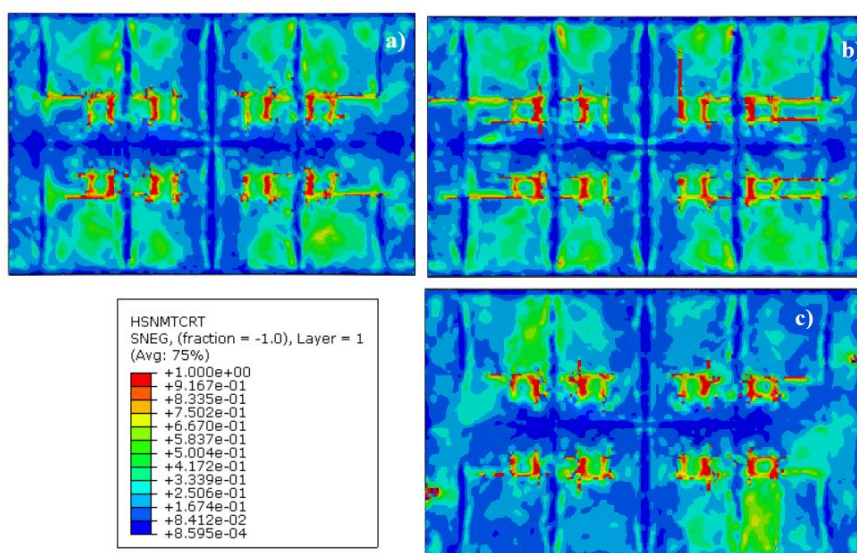


**Slika 72. Raspodjela naprezanja po Von Misesu jezgre debljine 8(a), 6 (b) i 10(c) mm u trenutku udara i na kraju simulacije [MPa]**

Na Slici 72 je dobro vidljiv utjecaj lokalnog opterećenja u središtu podnice kod mjesta direktnog kontakta sa sjedalima. Slika prikazuje naprezanje na kraju simulacije, a kontakt sa sjedalima još bolje prikazuje Slika 73 gdje su prikazane plastične deformacije.



**Slika 73.** Usporedba ekvivalentne plastične deformacije debljine jezgre 8(a), 6 (b) i 10(c) mm  
Vidljivo je kako se kod podnica s većom debljinom jezgre (8 i 10 mm) javlja veća koncentracija plastične deformacije te kako se kod podnice s najdebljom jezgrom (10 mm) počinje javljati i uz rubove.

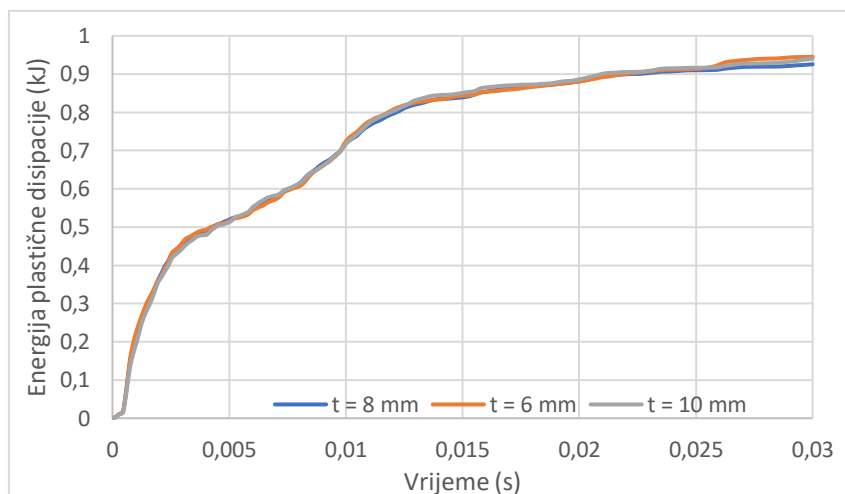


**Slika 74.** Raspodjela Hashinovog kriterija vlačnog popuštanja matrice za donji vanjski sloj sandwich podnica debljine jezgre 6(b), 8 (a) i 10(c) mm

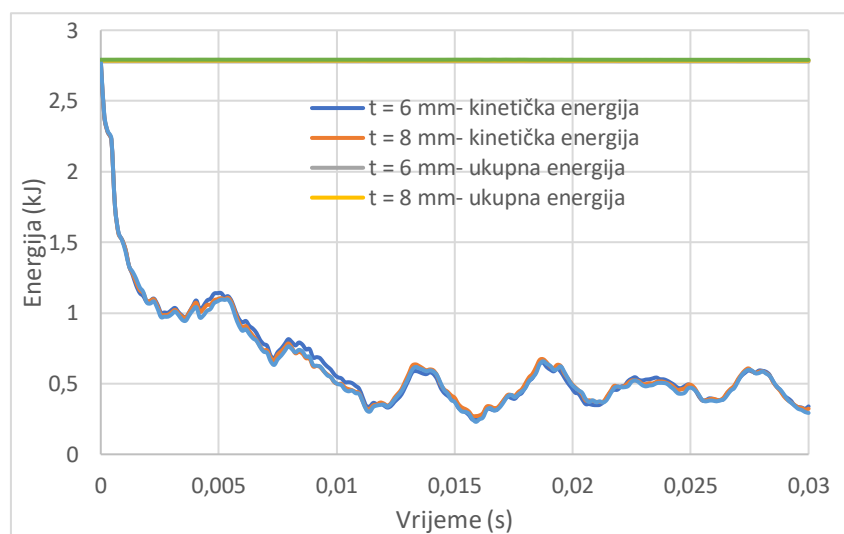
Slika 74 prikazuje vlačno popuštanje matrice donjeg vanjskog sloja sandwich podnica u zadnjem sloju tj. sloju u kontaktu s konstrukcijom poda. Sa slike se može zaključiti kako je do

popuštanja došlo na mjestu kontakta sa sjedalima u sva tri slučaja, te kod podnice s najdebljom jezgrom (10 mm) i na rubovima podnice.

Na Slikama 75 i 76 biti će prikazana energija plastične disipacije, ukupna i kinetička energija za sve tri simulacije.



**Slika 75. Dijagram energije plastične disipacije sandwich podnica različitih debljina jezgre**



**Slika 76. Kinetička i ukupna energija sandwich podnica različitih debljina jezgre**

Energija plastične disipacije bilježi nagli rast na početku simulacije, a kinetička pad. Oba dijagrama odnose se na cijeli model (konstrukcija poda, podnica i sjedala) što znači da se dijagram na Slici 75 odnosi na konstrukciju poda i jezgru jer se kod vanjskih slojeva od kompozita ne javlja plastičnost. Ukupna energija ostaje konstanta što označava da nije došlo do narušavanja stabilnosti sustava.

Sa slika se može uočiti da su razlike između energija simulacija ne zamjetne što znači da promjena debljine jezgre neće utjecati na unutarnju, ukupnu ni kinetičku energiju.

---

## 6. ZAKLJUČAK

Na preživljivost posade helikoptera pri padu veliki utjecaj ima konstrukcija sjedala te podnice i poda helikoptera. Također osim same konstrukcije, bitan je način spajanja konstrukcije, vrsta materijala i drugi čimbenici koji utječu na apsorpciju energije sjedala te prijenos energije na posadu.

Analiza aluminijske konstrukcije poda te konstrukcije spojene zakovicama pokazala je kako se najveće koncentracije naprezanja javljaju na mjestima spojeva konstrukcije, zakovica te mjestima redukcije mase te bi se ta područja u slučaju poboljšanja trebala detaljno analizirati. Akceleracija prema *Eiband* krivuljama prelazi područje ozbiljnih ozljeda, ali je vrijeme maksimalne vrijednosti akceleracije kratkotrajno što ne predstavlja toliku opasnost za čovjeka. Jednodijelni aluminijski model i model zakovicama pokazuju vrlo slične rezultate te u oba slučaja dobro poklapanje sa rezultatima numeričke analize iz [7]. Veća razlika bila bi vidljiva kada bi se cijela konstrukcija poda modelirala pomoću zakovičnog spoja, ali takav model imao bi previše kinematskih veza te bi bio vrlo nestabilan u dinamički nelinearnim analizama.

Kod analize kompozitnih podnica korištena je simulacija sjedalima što daje puno realnije rezultate. Kod *sandwich* podnica uočljiv je utjecaj vibracija na rezultate čemu je uzrok način spajanja sjedala te loša apsorpcija energije.

Visoka naprezanja izražena su samo na mjestu kontakta sjedala i podnica te je deformirani oblik podnice na kraju simulacije minimalan kako kod monolitne tako i kod *sandwich* podnice, što ukazuje na krutost cijele konstrukcije. Kod kompozitnih slojeva je uočeno kako na samo nekoliko mjesta dolazi do popuštanja vlakana prema *Hashin*ovom kriteriju, dok se kod posmičnog popuštanja vidi mnogo veći udio kod monolitnih podnica u odnosu na *sandwich* podnice. Također se kod monolitne kompozitne podnice može vidjeti utjecaj orijentacije slojeva; u slučaju akceleracije manji broj vršnih akceleracija i manje vrijednosti istih pokazala je orijentacija slojeva u više različitih smjerova (45/90/0/-45). Kod *sandwich* podnica najviši iznos vertikalne akceleracije i brzine javlja se kod podnice s najdebljom jezgrom (10 mm).

Eventualna daljnja analiza uključivala bi poboljšanja u smjeru apsorpcije energije udara te konstrukciji sjedala u svrhu smanjenja iznosa akceleracija te povećanja preživljivosti posade helikoptera.

---

**LITERATURA**

- [1] Shanahan D.: *Human tolerance and crash survivability*, RTO Organization, SAD, 2004.
- [2] Apostolo G: *The Illustrated Encyclopedia of Helicopters*, 1984.
- [3] Klapač J.: *Numerička analiza konstrukcije poda helikoptera pri udaru o tlo*, Diplomski rad, Zagreb, 2015.
- [4] Hughes K., Vignjević R., Campbell J. : *Experimental observations of an 8 m/s drop test of a metallic helicopter underfloor structure onto a hard surface part 1*, Journal of Aerospace Engineering, 2007.
- [5] Hughes K.: *Application of improved Lagrangian techniques for helicopter crashworthiness on water*, Doktorski rad, Cranfield University, 2005.
- [6] Bisagni C.: *Crashworthiness of helicopter subfloor structural components*, Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 1999.
- [7] Hughes K., Vignjević R., Campbell J.: *Application of the finite element method to predict the crashworthy response of a metallic helicopter underfloor structure onto a hard surface*, Cranfield University, 2007.
- [8] Pentecote N.: *Pre and post test simulations of component no.2 using Pam Shock, CAST*, 2001.
- [9] *Abaqus Analysis User`s Manual; Verion 6.8*, Dassault Sysemes, SAD, 2014.
- [10] Golub A.: *Numeričko modeliranje zakovičnih spojeva zrakoplovnih konstrukcija*, Diplomski rad, Zagreb, 2018.
- [11] Smojver I.: *Mehanika kompozitnih materijala*, predavanja, Zagreb, 2007.
- [12] Ilcewicz L., Ashforth C.: *Advanced composite materials, Chapter 7*, Federal Aviation Administration, SAD, 2015.
- [13] Kollar L., Springer G.: *Mechanics of composite structures*, Cambridge University Press, 2003.
- [14] Ivančević D.: *Analiza udarnih oštećenja zakrilca velikog putničkog aviona*, Diplomski rad, Zagreb, 2008.
- [15] Markulin M.: *Numeričko modeliranje udarnih oštećenja sandwich konstrukcija pri malim brzinama udara*, Diplomski rad, Zagreb, 2018.
- [16] Yost C., Oates R.: *Human survival in aircraft emergencies*, NASA contractor report, 1969.

---

## **PRILOZI**

### **I. CD-R disc**