Numeričko modeliranje utjecaja geometrije jezgre sendvič konstrukcije na apsorpciju energije udara

Zubak, Jure

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:235:678407

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-25**

Repository / Repozitorij:

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

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

DIPLOMSKI RAD

Jure Zubak

Zagreb, 2020.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

DIPLOMSKI RAD

Numeričko modeliranje utjecaja geometrije jezgre sendvič konstrukcije na apsorpciju energije udara

Mentor:
doc. dr. sc. Darko Ivančević

Student:
Jure Zubak

Zagreb, 2020.

Zahvaljujem se svom mentoru doc.dr.sc. Darko Ivančević, mag.ing. za pruženu priliku, pomoć te podršku pruženu prilikom pisanja ovog rada.
Također se zahvaljujem i svojoj obitelji na podršci tijekom studiranja.
Hvala!

Izjava

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

Zagreb, studeni 2020. Jure Zubak

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija zrakoplovstva

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: 602 - 04 / 20 - 6 / 3	
Ur. broj: 15 - 1703 - 20 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Jure Zubak** Mat. br.: 0035199122

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Numeričko modeliranje utjecaja geometrije jezgre sendvič konstrukcije na apsorpciju energije udara**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Numerical modelling of the effect of sandwich structure core geometry on the impact energy absorption**

Opis zadatka:

Sendvič konstrukcije se zbog svoje izvrsne specifične krutosti i čvrstoće u velikoj mjeri koriste za izradu različitih dijelova konstrukcije zrakoplova. Zbog specifične izvedbe, sendvič konstrukcije omogućuju izradu konstrukcijskih dijelova koji mogu znatno ublažiti sile koje se prenose na ostatak konstrukcije pri udarnom opterećenju zrakoplova. U radu je potrebno provesti analizu utjecaja izvedbe jezgre sendvič konstrukcije na apsorpciju energije udara i iznose sila koje se prenose na ostatak konstrukcije pri udarnom opterećenju.

U okviru diplomskog rada potrebno je:
- napraviti pregled dostupne literature o numeričkim pristupima, materijalnim modelima i modelima oštećivanja koji se koriste za modeliranje sendvič konstrukcija,
- odabrati nekoliko geometrija jezgre sendvič konstrukcija koje će biti analizirane u radu,
- izraditi numeričke modele prikladne za simulaciju udarnih oštećenja sendvič konstrukcija na temelju odabranih geometrija jezgre,
- numeričku analizu provesti u programu *Abaqus/Explicit®*,
- provesti validaciju numeričkog pristupa primjenom dostupnih rezultata eksperimenata iz literature,
- kod simulacije udarnih oštećenja uzeti u obzir sve relevantne načine popuštanja sendvič konstrukcija,
- procijeniti mogućnosti korištene numeričke metodologije za analizu realnih sendvič konstrukcija u zrakoplovstvu.

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

Zadatak zadan:	Rok predaje rada:	Predvideni datumi obrane:
24. rujna 2020.	26. studenoga 2020.	30.11. – 4.12.2020.

Zadatak zadao: Predsjednik Povjerenstva:

Doc. dr. sc. Darko Ivančević Prof. dr. sc. Milan Vrdoljak

Sadržaj

Sadržaj v

Popis slika vii

Popis tablica xi

Popis oznaka xii

Sažetak xiii

Summary xiv

1. Uvod 1

1.1. Udarna oštećenja 1

1.2. Općenito o sendvič kompozitima 2

2. Kompozitne sendvič konstrukcije 5

2.1. Vanjski slojevi 5

2.1.1. Načini popuštanja vanjskih slojeva 5

2.2. Jezgra 7

2.2.1. Načini popuštanja jezgre 8

2.3. Izvedbe sendvič jezgara 9

2.3.1. Saćasta konstrukcija 9

2.3.2. Trapezna konstrukcija 10

2.3.3. Trokutasta konstrukcija 12
2.4. Opis zadatka 13

3. Numerički modeli **14**
3.1. Mehanička svojstva vanjskih slojeva i jezgre 14
3.1.1. Mehanička svojstva vanjskih slojeva 14
3.1.2. Mehanička svojstva jezgre 15
3.2. Model geometrije saća 16
3.3. Model geometrije trapeza 19
3.4. Model geometrije trokuta 20
3.5. Rubni uvjeti 23
3.6. Opterećenje 23

4. Validacija numeričkog modela **25**

5. Rezultati **29**
5.1. ALLDMD - Energija disipirana oštećenjem 29
5.1.1. Energija udara 3 J 29
5.1.2. Energija udara 7 J 30
5.1.3. Energija udara 10 J 32
5.2. ALLPD - Energija disipirana plastičnom deformacijom 39
5.2.1. Energija udara 3 J 39
5.2.2. Energija udara 7 J 39
5.2.3. Energija udara 10 J 44
5.3. ALLKE - Kinetička energija 46
5.3.1. Energija udara 7 J 47
5.3.2. Energija udara 10 J 49
5.4. Sile koje se prenose na ostatak konstrukcije 50
5.4.1. Energija udara 3 J 51
5.4.2. Energija udara 7 J 52
5.4.3. Energija udara 10 J 54

6. Zaključak **56**

Literatura **57**

Popis slika

1.1 Oštećenje na zrakoplovu kao posljedica udara leda [1] 2
1.2 Skica sendvič konstrukcije [2] 3
1.3 Različite jezgre sendvič konstrukcija [2] 4

2.1 Načini popuštanja vanjskih slojeva,
a) popuštanje, b)međućelijasto stvaranje pukotina, c) gužvanje [2] 6
2.2 NOMEX [3] 7
2.3 Načini popuštanja jezgre a) smicanje, b) lokalno prodiranje [2] 8
2.4 3 smjera saćaste konstrukcije [4] 10
2.5 Način spajanja trapezne jezgre [5] 11
2.6 Trapezni sendvič panel [6] 11
2.7 Trokutni sendvič panel [7] 12

3.1 Mehanička svojstva materijala vanjskih slojeva [8] 15
3.2 Mehanička svojstva materijala jezgre 16
3.3 Geometrija polovice saćaste jezgre [9] 17
3.4 Model saćaste jezgre, 120 mm x120 mm x10 mm 18
3.5 Mreža elemenata saćaste jezgre 19
3.6 Crtež trapezne geometrije 20
3.7 Model trapezne jezgre 20
3.8 Mreža elemenata trapezne jezgre 21
3.9 Geometrija trokutne jezgre, dimenziju u [m] 21
3.10 Model trokutne jezgre 22

3.11 Mreža elemenata trokutne jezgre 22
3.12 Rubni uvjeti; a) uklještenje po donjim rubovima b) omogućeno gibanje samo po vertikalnoj osi 24

4.1 Eksperimentalni rezultati apsorbirane energije [10] 25
4.2 Kinetička energija udara od 3 J 26
4.3 Kinetička energija udara od 7 J 26
4.4 Kinetička energija udara od 10 J 27
4.5 Parametri vlačnog oštećenja matrice kompozita kompozita za energije udara od a) 3 J, b) 7 J i c) 10 J 28
4.6 Raspodjela ekvivalentnih plastičnih deformacija jezgre u saćastom sendvič kompozitu za energije udara od a) 3 J, b) 7 J i c) 10 J 28

5.1 ALLDMD pri energiji udara od 3 J i visini jezgre od 5 mm 30
5.2 ALLDMD pri energiji udara od 3 J i visini jezgre od 10 mm 30
5.3 Raspodjela parametara opterećenja vlačnog popuštanja matrice pri energiji udara od 3 J i visinu jezgre od 10 mm 31
5.4 ALLDMD pri energiji udara od 7 J i visini jezgre od 5 mm 31
5.5 ALLDMD pri energiji udara od 7 J i visini od 10 mm 32
5.6 Raspodjela parametara opterećenja vlačnog popuštanja matrice pri energiji udara od 7 J i visini od 5 mm 33
5.7 Raspodjela parametara opterećenja vlačnog popuštanja matrice pri energiji udara od 7 J i visini od 10 mm 33
5.8 ALLDMD pri energiji udara od 10 J i visini jezgre od 5 mm 34
5.9 ALLDMD pri energiji udara od 10 J i visini jezgre od 10 mm 34
5.10 Raspodjela parametara opterećenja vlačnog popuštanja matrice pri energiji udara od 10 J i visini od 5 mm 35
5.11 Raspodjela parametara opterećenja vlačnog popuštanja matrice pri energiji udara od 10 J i visini od 10 mm 35
5.12 Raspodjela parametara opterećenja tlačnog popuštanja vlakana 36
5.13 Raspodjela parametara opterećenja vlačnog popuštanja vlakana 36
5.14 Raspodjela parametara opterećenja vlačnog popuštanja vlakana, pri energiji udara od 10 J i visini jezgre od 10 mm 37

5.15 Raspodjela parametara opterećenja tlačnog popuštanja matrice, pri energiji udara od 10 J i visini jezgre od 10 mm 37
5.16 Raspodjela ekvivalentne plastične deformacije za energiju udara od 3 J i visinu jezgre od 5 mm 39
5.17 Raspodjela ekvivalentne plastične deformacije za energiju udara od 3 J i visinu jezgre od 10 mm 40
5.18 ALLPD pri energiji udara od 3 J i visini jezgre od 5 mm 40
5.19 ALLPD pri energiji udara od 3 J i visini jezgre od 10 mm 41
5.20 ALLPD pri energiji udara od 7 J i visini jezgre od 5 mm 41
5.21 ALLPD pri energiji udara od 7 J i visini jezgre od 10 mm 42
5.22 Raspodjela ekvivalentne plastične deformacije za energiju udara od 7 J i visinu jezgre od 5 mm 42
5.23 Raspodjela ekvivalentne plastične deformacije za energiju udara od 7 J i visinu jezgre od 10 mm 43
5.24 ALLPD pri energiji udara od 10 J i visini jezgre od 5 mm 43
5.25 ALLPD pri energiji udara od 10 J i visini jezgre od 10 mm 44
5.26 Raspodjela ekvivalentne plastične deformacije za energiju udara od 10 J i visinu jezgre od 5 mm 44
5.27 ALLKE pri energiji udara od 3 J i visini jezgre od 5 mm 46
5.28 ALLKE pri energiji udara od 3 J i visini jezgre od 10 mm 47
5.29 ALLKE pri energiji udara od 7 J i visini jezgre od 5 mm 48
5.30 ALLKE pri energiji udara od 7 J i visini jezgre od 10 mm 48
5.31 ALLKE pri energiji udara od 10 J i visini jezgre od 5 mm 49
5.32 ALLKE pri energiji udara od 10 J i visini jezgre od 10 mm 50
5.33 Sile koje se prenose na ostatak konstrukcije pri energiji udara od 3 J i visini jezgre od 5 mm 51
5.34 Sile koje se prenose na ostatak konstrukcije pri energiji udara od 3 J i visini jezgre od 10 mm 52
5.35 Sile koje se prenose na ostatak konstrukcije pri energiji udara od 7 J i visini jezgre od 5 mm 53
5.36 Sile koje se prenose na ostatak konstrukcije pri energiji udara od 7 J i visini jezgre od 10 mm 53

5.37 Sile koje se prenose na ostatak konstrukcije pri energiji udara od 10 J i visini jezgre od 5 mm 54
5.38 Sile koje se prenose na ostatak konstrukcije pri energiji udara od 10 J i visini jezgre od 10 mm 55

Popis tablica

1.1 Usporedba sendvič konstrukcija i laminata [11] 3

3.1 Mehanička svojstva vanjskih slojeva 14
3.2 Hashin parametri vanjskih slojeva 15
3.3 Mehanička svojstva jezgre 15
3.4 Usporedba računalnih modela 23

Popis oznaka

E	Modul elastičnosti, [GPa]	14
G	Modul smičnosti, [GPa]	14
h	Visina laminata, [mm]	14
p	jednoliko kontinuirano opterećenje, [N/mm^2]	6
t	debljina stijenke sendvič konstrukcije, [mm]	6
U	energija deformiranja, [J]	6
u,v,w	Pomaci u smjeru osi x,y,z, [mm]	6
X_C	Tlačna čvrstoća u smjeru vlakna, [MPa]	16
X_T	Vlačna čvrstoća u smjeru vlakna, [MPa]	16
Y_C	Tlačna čvrstoća okomito na smjer vlakna, [MPa]	16
Y_T	Vlačna čvrstoća okomito na smjer vlakna, [MPa]	16
Z_C	Tlačna čvrstoća u smjeru osi z, [MPa]	16
Z_T	Vlačna čvrstoća u smjeru osi z, [MPa]	16
$\mathbf{M}$	Vektor momenata u laminatu, [Nmm]	6
$\mathbf{N}$	Vektor sila u laminatu, [N]	6
$\mathbf{S}$	Tenzor podatljivosti, [mm^2/N]	6
ϵ	Vektor deformacija, [-]	14
γ	Kutna deformacija, [-]	14
ν_{ij},i,j=1,2,3	Poissonovi koeficijenti s obzirom na glavne osi, [-]	14
θ	Postavni kut sloja, [^{o}]	14
$\vec{\sigma}$	Vektor naprezanja, [N/mm^2]	14

Sažetak

U ovom radu bilo je potrebno izvršiti numeričko modeliranje kompozitnih sendvič konstrukcija te analizu udarnih oštećenja pri malim brzinama. Korištene su tri različite izvedbe jezgri. Prva je postojeća geometrija saća, druga je trapezoidalna valovita jezgra, a treća jest trokutasta valovita jezgra. Materijal jezgre jest NOMEX, a vanjski slojevi izrađeni su od kompozita ojačanih ugljičnim vlaknima. Podaci o materijalima dobiveni su pretragom dostupne literature o navedenom području. Navedena je uloga sendvič kompozita u industriji. Potom je opisana konstrukcija sendvič kompozita, kao i različite izvedbe. Prikazani su modeli oštećenja vanjskih slojeva te jezgre, kao i svojstva materijala. Numeričko modeliranje udarnog oštećenja sastojalo se od variranja različitih brzina udara te visina jezgre za svaku pojedinu izvedbu. Validacija je izvedena usporedbom rezultata s eksperimentalnim rezultatima iz prethodno dostupnih radova. Zatim su prikazani rezultati apsorbiranih energija pomoću preostale kinetičke energije, energije koju je apsorbirala jezgra te energije koju su na sebe preuzeli vanjski slojevi. Spomenuti rezultati prikazani su u ovisnosti o vremenu udara. Nadalje, prikazani su i rezultati sila koje se prenose na ostatak konstrukcije u ovisnosti o vremenu udara. Rezultati su prikazani za sve analizirane kombinacije brzine udara, visine jezgre te izvedbe same jezgre. Na kraju je napravljena usporedba različitih izvedbi jezgre s obzirom na mogućnost apsorpcije energije te prenošenja sila na ostatak konstrukcije.

Ključne riječi: saće, NOMEX, sendvič, kompoziti, udarno oštećenje.

Summary

In this thesis it was necessary to deal with the numerical modelling of composite sandwich structures with induced low-velocity impact damage. Three different structures were analysed: the realistic honeycomb core, the corrugated trapezoidal structure and the triangular structure. The material of the core is NOMEX and the outer layers are made of carbon fiber reinforced polymer. The material data were collected by studying the relevant literature. In this thesis first the importance of sandwich composite panels is explained. Then the damage mechanisms of the outer layers and the core were presented. The numerical modeling of impact damages includes the analysis for many different impact energies as well as for several core dimensions. The validation of the numerical models was performed using available experimental data. The results were then presented using the remaining kinetic energy, the energy dissipated from the core and the energy dissipated from the outer layers. Then the forces on the rest of the structure were shown as a function of time. The results were shown for all impact velocities, dimensions of the core and the different concepts of the shape of the core. Finally, a comparison was made between different cores on their ability to absorb energy and to transfer forces to the rest of the structure.

Keywords: Honeycomb, NOMEX, sandwich, composite, impact damage.

1 Uvod

1.1. Udarna oštećenja

Udarna oštećenja su uvijek aktualan problem kod kompozitnih konstrukcija. Bilo da je riječ o kopnenom, morskom ili pak zračnom prijevozu, gotovo je sigurno da će se u određenom trenutku naići na problem udarnih oštećenja. Prijevozna sredstva su često skupa za održavanje, a zastoj izazvan neispravnim funkcioniranjem vozila može izazvati velike novčane gubitke, primjer nastale štete može se vidjeti na slici 1.1. Osim materijalnih gubitaka, loše podnošenje udarnih oštećenja, nažalost, nerijetko uzrokuje i ljudske žrtve.

Zbog navedenih razloga jako je bitno pronaći rješenje koje će omogućiti uspješno nošenje s oštrim zahtjevima koje današnjica stavlja na prometnu industriju.

U posljednjih nekoliko desetljeća kompoziti su doživjeli snažan razvoj; zahtjevi za što lakšim, čvršćim te krućim konstrukcijama nadišli su sposobnosti klasičnih materijala. Javila se potreba za materijalima koji omogućavaju fleksibilnost u vidu kombiniranja željenih svojstava određenih skupina materijala. Zahtjevi u svim industrijama znatno su se pooštrili, a posebice u zrakoplovnoj industriji gdje je stavljen dodatan naglasak na uštedi mase te sigurnosti putnika i tereta.

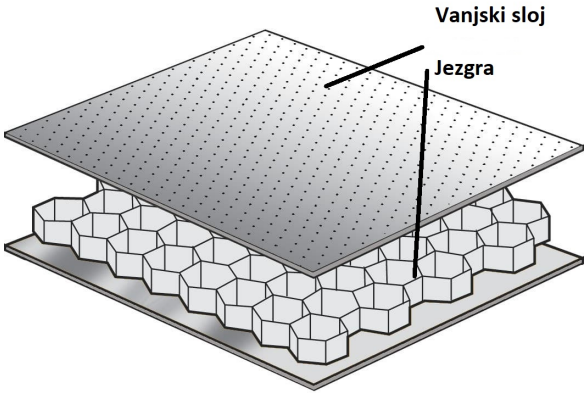
U takvim okolnostima do izražaja dolaze kompozitne sendvič konstrukcije koje omogućuju vrlo dobru kombinaciju više željenih svojstava; visoke čvrstoće uzrokovane vanjskim slojevima, visoke krutosti uzrokovane jezgrom te sveukupno male mase. Takvi materijali predstavljaju velik potencijal, no problemi nastaju u gotovo beskrajnom broju različitih kombinacija izvedbi, dimenzija te materijala koji se mogu koristiti. Toliki broj mogućnosti otežava jednostavne usporedbe te gotovo isključuje analitička rješenja mo-

dela. Najvjernije analize su testiranje na određeno ponašanje putem eksperimenata, međutim, takav je oblik testiranja vrlo skup te je često potrebno mnogo vremena za izradu i pripremu testnog uzorka. Iz tog razloga sve su zastupljenije numeričke analize koje omogućuju brze i jeftine analize uz dovoljno točnost. Zbog toga je potrebno koristiti numeričke simulacije kako bi se mogle usporediti različite izvedbe te izvući zaključak o utjecaj određenih parametara na svojstva kompozitnog sendvič panela. Slika 1.1 prikazuje značajno oštećenje zrakoplova nastalo prilikom udara leda.

Slika 1.1: Oštećenje na zrakoplovu kao posljedica udara leda [1]

1.2. Općenito o sendvič kompozitima

Sendvič kompoziti često se koriste u industriji zbog izvrsnih svojstava kao što su mogućnost apsorpcije energije, mala masa konstrukcije, visoka čvrstoća te krutost.
Iako takvi materijali posjeduju velik potencijal u obliku raznolikosti primjene te mnoštva izvedbi, potrebna je detaljna analiza za svaku pojedinu izvedbu jer se svojstva mogu značajno promijeniti mijenjanjem samo jednog od mnogih parametara.
Sendvič kompoziti sastoje se od para tankih, ali čvrstih vanjskih slojeva (eng. *facing, facesheet*) i relativno debele, ali lagane jezgre čija je uloga prenošenje opterećenja na vanjske slojeve. No glavna uloga jezgre jest razdvajanje vanjskih slojeva kako bi se pomoću *Steinerovog* dodatka povećala savojna krutost kompozita.



Slika 1.2: Skica sendvič konstrukcije [2]

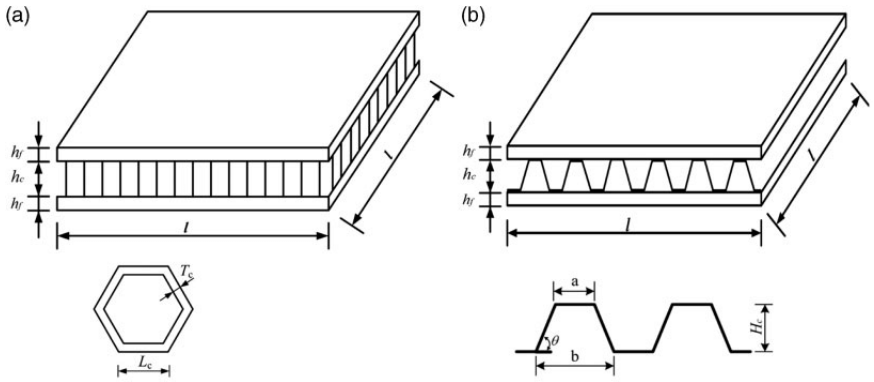
Da bi se bolje stekao dojam o efikasnosti povećanja čvrstoće i krutosti ovim putem, prikazat će se usporedba sendvič konstrukcije i monolitne konstrukcije koristeći jednostavnu teoriju grede [11].

Tablica 1.1: Usporedba sendvič konstrukcija i laminata [11]

Visina kompozita/jezgre	t/0	t/2t	2t/4t
Relativna savojna krutost	1	7,0	37
Relativna savojna čvrstoća	1	3,5	9,2
Relativna težina	1	1,03	1,06

Iz rezultata iz tablice 1.1 vidljivo je da su ovakve konstrukcije primjenjive u situacijama koje zahtijevaju visoke karakteristike uz malu masu.
Vanjski slojevi često su izrađeni od vlaknima ojačanih kompozita, no mogu biti izrađeni i od izotropnih materijala. Vrlo je bitno da su pravilno spojeni s jezgrom kako bi se osigurao ispravan prijenos opterećenja te kako bi se izbjegle eventualne nepoželjne kemijske reakcije između određenih materijala. Najčešći oblik povezivanja jest pomoću raznih adheziva.

Jezgra mora biti simetrična po poprečnom presjeku. Često se koriste materijali poput drveta, aluminija te raznih polimera. Jezgra prvenstveno treba biti lagana. Da bi se to postiglo, često se osim pjena koriste oblici koji omogućuju jednaku krutost uz manju masu. Primjeri toga su: saćasta konstrukcija (eng. *honeycomb*), valovita struktura (eng. *corrugated structure*) te drugi [12].



Slika 1.3: Različite jezgre sendvič konstrukcija [2]

Na slici 1.3 prikazane su sheme (a) konstrukcije saća i (b) valovite (trapezoidalne) konstrukcije.

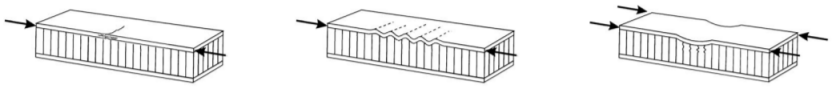
2 Kompozitne sendvič konstrukcije

2.1. Vanjski slojevi

Ako se govori o vlaknima ojačanim kompozitima, postoji nekoliko različitih izvedbi. Kompoziti izrađeni od tankih slojeva (eng. *plies*), rade se na način da se nekoliko kompozitnih slojeva kombinira na način da se postignu željena svojstva konstrukcije. Sloj koji ima sva vlakna u jednom smjeru zove se jednosmjerni (eng. *unidirectional*). Svaki sloj može tako imati zasebnu orijentaciju.
U drugoj izvedbi kompozitni sloj proizvodi se pletenjem vlakana u više smjerova, a zove se pleteni (eng. *woven*) kompozit.
Još jedna izvedba je da se koriste kraća vlakna nasumične orijentacije. Ona posjeduju nešto nepovoljnija svojstva, međutim jeftinija su za proizvodnju.

2.1.1. Načini popuštanja vanjskih slojeva

Za razliku od krutosti, čvrstoću sendvič konstrukcija je teže odrediti. Za početak, potrebno je definirati kriterije. Uobičajeni načini popuštanja su popuštanje vanjskih slojeva (eng. *face yielding*), gužvanje vanjskih slojeva (eng- *face wrinkling*) te međućelijasto stvaranje pukotina(eng. *intra-cell dimpling*)[9].
Geometrija konstrukcije, svojstva vanjskih slojeva, te samo opterećenje utječu na kritični način loma.
Slika 2.1 prikazuje tri načina oštećivanja vanjskih slojeva.
U ovom radu se za opisivanje oštećenja vlaknima ojačanih kompozita koristi Hashinov kriterij. On korist više od jedne komponente naprezanja kako bi ocjenio različite načine



(a) Face yielding (b) Intra-cell dimpling (c) Face wrinkling

Slika 2.1: Načini popuštanja vanjskih slojeva,
a) popuštanje, b)međućelijasto stvaranje pukotina, c) gužvanje [2]

popuštanja [4]. Kriterij je prvenstveno razvijen za jednousmjerene polimere, pa primjenom na drugačije izvedbe ojačanja unosi značajnu grešku aproksimacije. Kako bi se zadržala određena točnost, potrebno ga je koristiti u modelima koji uzimaju u obzir ponašanje materijala nakon inicijacije oštećenja te uz pretpostavku ravninskog stanja naprezanja.
Hashin-ov kriterij obuhvaća četiri načina popuštanja:
- pucanje vlakna po vlačnim opterećenjem

$$F_f^t = \left(\frac{\hat{\sigma_{11}}}{X^T}\right)^2 + \alpha\left(\frac{\hat{\tau}_{12}}{S^L}\right)^2, \tag{2.1}$$

- izvijanje vlakna pod tlačnim opterećenjem

$$F_f^c = \left(\frac{\hat{\sigma_{11}}}{X^C}\right)^2, \tag{2.2}$$

- lom matrice pod poprečnim vlačnim opterećenjem

$$F_m^t = \left(\frac{\hat{\sigma_{22}}}{Y^T}\right)^2 + \alpha\left(\frac{\hat{\tau}_{12}}{S^L}\right)^2, \tag{2.3}$$

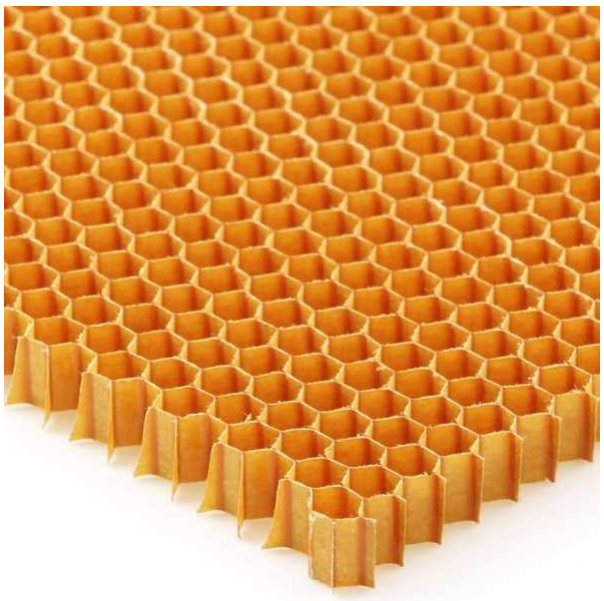
- lom matrice pod poprečnim tlačnim opterećenjem.

$$F_m^c = \left(\frac{\hat{\sigma_{22}}}{2S^T}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y^c}{2S^T}\right) - 1\right]\left(\frac{\hat{\sigma_{22}}}{Y^L}\right)\left(\frac{\hat{\tau_{12}}}{S^L}\right)^2. \tag{2.4}$$

2.2. Jezgra

Glavna zadaća jezgre u kompozitnim sendvič konstrukcijama jest da drži vanjske slojeve na dovoljno velikoj udaljenosti kako bi se pomoću Steinerovog dodatka povećala savojna krutost kompozita.
Osim te zadaće, jezgra također treba uspješno prenositi opterećenja na vanjske slojeve, održavati oblik kompozita, a zaslužna je i za velik udio apsorpcije energije udara u kompozit.

U ovom radu za materijal jezgre odabran je NOMEX. NOMEX je jako popularan materijal koji se jako često koristi u zrakoplovstvu zbog mnoštva povoljnih svojstava; visoke specifične čvrstoće, izvrsne apsorpcije energije, male gustoće, izvrstan je električni i termalni izolator, kemijski je stabilan, ne gori, a otporan je i na koroziju i zamor[6].
Izrađuje se na način da se na aramidni papir, koji može biti različitih oblika i debljina, nanosi smola.



Slika 2.2: NOMEX [3]

2.2.1. Načini popuštanja jezgre

Ponašanje ploča relativno je jednostavno predvidljivo, no modeliranje ponašanja jezgri ovisi o mnogo parametara koji kompliciraju proračun. Svojstva jezgre, geometrija konstrukcije te samo opterećenje značajno utječu na kritične načine popuštanja. Značajni načini popuštanja su smicanje jezgre (eng. *core shear*) i lokalno prodiranje (eng. *local indentation*). Oba mehanizma prikazana su na slici 2.3:

(a) Core shear (b) Local indentation

Slika 2.3: Načini popuštanja jezgre a) smicanje, b) lokalno prodiranje [2]

Za promatranje smicanja jezgre može se uzeti primjer savijanja u tri točke. Zbog puno veće krutosti ploča u usporedbi s jezgrom, posmično naprezanje će kroz jezgru biti konstantno. Do popuštanja će doći u trenutku kada spomenuto posmično naprezanje prekorači posmičnu čvrstoću u tom smjeru [13]. Jezgra je anizotropna što znači da joj svojstva uvelike ovise o smjeru naprezanja, odnosno da posmična čvrstoća uvelike ovisi o smjeru opterećenja.

Lokalno prodiranje javlja se prilikom pritiska stranog tijela. Pritisak može biti dugotrajan, primjerice kod testiranja savijanja ili pak kratkotrajan, prilikom udara stranog tijela. O krutosti ploče i jezgre ovisi veličina oštećenja, odnosno prostor po kojem će se opterećenje proširiti. Do popuštanja će doći u trenutku u kojem tlačno naprezanje postane veće od vanravninske tlačne čvrstoće jezgre.

2.3. Izvedbe sendvič jezgara

2.3.1. Saćasta konstrukcija

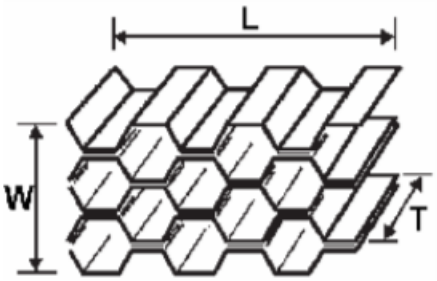
Saćasta konstrukcija jedna je od najčešće korištenih konstrukcija kako u zrakoplovnoj, tako i u mnogim drugim industrijama. Razlozi za to se mogu pronaći u dobroj kombinaciji omjera cijene i povoljnih svojstava.
Zbog procesa proizvodnje koji je relativno lako automatizirati, saćaste konstrukcije su cijenom dostupnije od nekih kompliciranijih izvedbi, a zbog izvrsnih karakteristika znatno su zastupljenije od nekih jeftinijih materijala [4].
Saćaste konstrukcije izvrsno apsorbiraju energiju udara, a pružaju i izvanrednu krutost. Nadalje, i izbor materijala koji mogu biti oblikovani u saćastu konstrukciju je vrlo širok [14].
Kao glavne nedostatke saćaste konstrukcije potrebno je navesti teško izvedive preglede djelova u eksploataciji nerazornim metodama, opasnost od oštećenja uzrokovanog zaostalom vodom u ćelijama, te nemogućnost prilagođavanja kompleksnijim te jako zakrivljenim oblicima.

Mehanizmi oštećivanja saćastih konstrukcija

Mehanizme oštećivanja saćastih konstrukcija je relativno jednostavno za opisati.
Ako se govori o tlačenju u ravnini, prvo dolazi do tlačenja ćelija tijekom kojeg se one linearno elastično deformiraju.
Prekoračenjem kritične deformacije, ovisno o materijalu te debljini stijenke, dolazi do kolapsa ćelije elastičnim izvijanjem, plastičnim pucanjem ili pak krhkim lomom. Završetak kolapsa označava trenutak u kojem stijenka jedne ćelije dotakne susjednu.

Pri vlačnom naprezanju dolazi do savijanja. Izvijanje je moguće samo pri tlačnom naprezanju. I ovdje samo ponašanje značajno ovisi o vrsti materijala. Krhki materijali će dovesti do pucanja stijenki, dok će plastični uzrokovati izraženu plastičnost konstrukcije.
Ako pak govorimo o neravninskom naprezanju, stijenke će ponovno osjetiti elongaciju ili kompresiju, no modul elastičnosti te vlačna čvrstoća suznačajno veći u tom smjeru.

Smjer neravninskog naprezanja poklapa se s visinom saćaste konstrukcije, odnosno udaljenosti između vanjskih slojeva sendvič kompozita.
Uobičajeno je definirati tri smjera osnovne saćaste jezgre: uzduž smjera prostiranja ćelija (eng. *cross-machine direction, web direction*)-T, okomito (eng. *machine direction, roll direction*)-L te smjer okomit na prethodna dva - W, kako prikazuje slika 2.4.

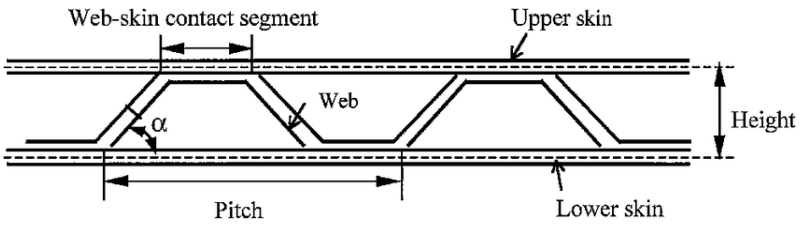


Slika 2.4: 3 smjera saćaste konstrukcije [4]

2.3.2. Trapezna konstrukcija

Trapezna konstrukcija ima dosta sličnosti sa saćastom, ali i neke značajne razlike. Za početak, proces poizvodnje je jako sličan. Trapezna, odnosno valovita (eng. *wave, corrugated*) jezgra izrađuje se kao i jedan niz saćaste jezgre, ekstrudira se, a potom oblikuje setovima valjaka [7].
Ako se govori o spajanju s vanjskim slojevima, značajna je razlika u orijentaciji same jezgre. Saćasta je orijentirana 'okomito', to jest, ravnina simetrije je paralelna vanjskim slojevima. Valovita konstrukcija ima ravninu simetrije okomito na vanjske slojeve kompozita.
Trapezna konstrukcija je samo jedna podvrsta valovitih konstrukcija. Često se koristi jer je spoj između vanjskih slojeva i jezgre puno čvršći i lakši za izvesti nego od čisto valovite konstrukcije. Razlog za to je što vrhovi trapeza potpuno dodiruju kompozitne ploče i tako čine površinu prigodnu za nanošenje adheziva, kako prikazuje slika 2.5.

Prednosti trapezne konstrukcije u odnosu na saćastu su da je jednostavnija za proizvodnju, što smanjuje cijenu, a također je i jednostavna za montirati. Sama fleksibilnost jezgre, kao posljedica činjenice da se radi o samo jednom sloju, odnosno nizu savijenog materijala, omogućuje valovitoj strukturi lakšu prilagodbu površinama sa zakrivljenosti



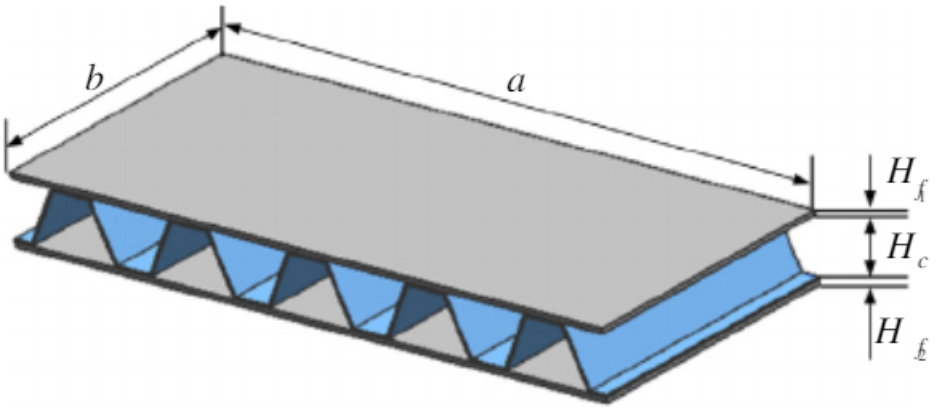
Slika 2.5: Način spajanja trapezne jezgre [5]

u samo jednoj ravnini. Ukoliko je riječ o zakrivljenosti u dvije ravnine, i valovita jezgra će imati problema s praćenjem oblika.

Trapezna konstrukcija je prikladnija za male visine kompozita jer pri velikim visinama dolazi do gubitka krutosti jezgre. Uzrok tomu je činjenica da se povećavanjem visine jezgre povećava dužina stranica što povećava mogućnost da dođe do izvijanja [2].

U usporedbi sa saćastom konstrukcijom, za istu debljinu kompozitnog sendvič panela, jezgra trapezne konstrukcije ima otprilike pet puta manju masu od saćaste jezgre. Kako bi usporedba bila što vjerodostojnija, a mase kompozitnih sendvič panela što bliže, pri analizi je uzeta pet puta deblja stijenka trapezne jezgre nego što je to bio slučaj kod saćaste kako je objašnjeno u poglavlju 3.3..

Slika 2.6 prikazuje kompozitni sendvič panel s trapeznom jezgrom.



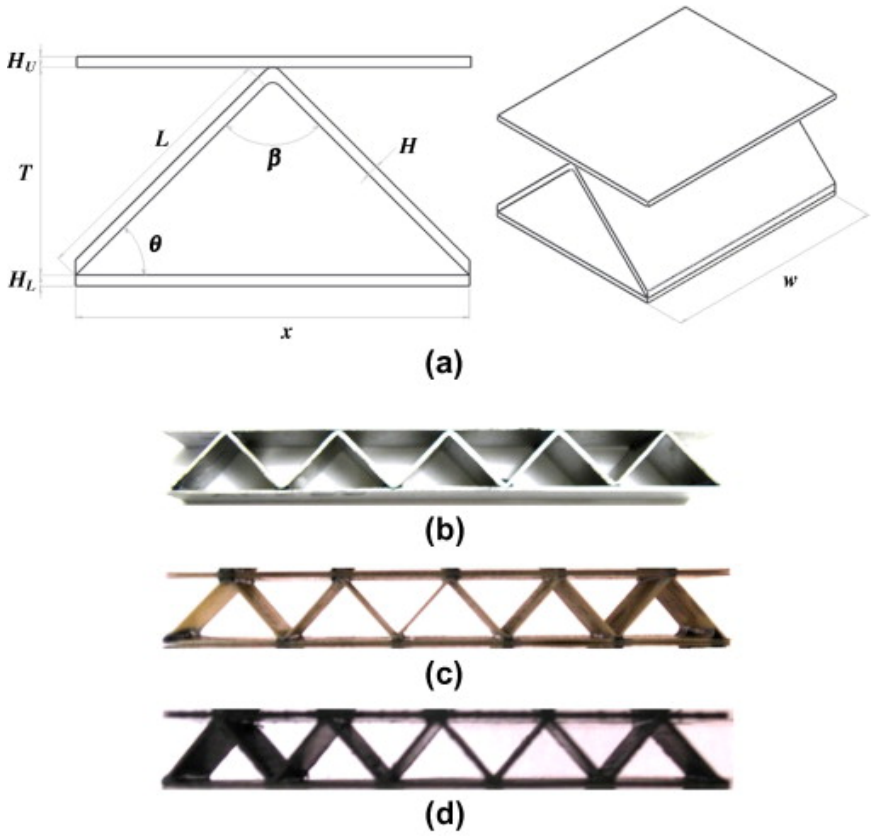
Slika 2.6: Trapezni sendvič panel [6]

2.3.3. Trokutasta konstrukcija

Trokutasta, odnosno rešetkasta jezgra je još jedna izvedba valovite konstrukcije te je jako slična trapeznoj. Glavna razlika je u tome što se, u usporedbi s trapeznom, uklanja horizontalni dio površine koji naliježe na vanjske slojeve. To za posljedicu ima nešto veću gustoću poprečnih elemenata u odnosu na trapeznu, pa je za očekivati da će imati i veću krutost.

Isto kao i za trapeznu, zbog same izvedbe, na jednakoj površini i pri istoj debljini stijenke, rešetkasta će jezgra imati manju masu. Iz tog razloga je i u ovom slučaju potrebno napraviti korekciju kako bi se uspoređivali paneli jednakih masa, pa će se tako i kod trokutaste jezgre uzeti veća debljina stijenke.

Slika 2.7 prikazuje kompozitni sendvič panel s trokutastom jezgrom.



Slika 2.7: Trokutni sendvič panel [7]

2.4. Opis zadatka

U zadatku je potrebno odabrati nekoliko različitih izvedbi kompozitnih sendvič konstrukcija te analizirati njihovu mogućnost podnošenja udara. Analiza će se izvesti za svaku pojedinu izvedbu jezgre s tri različite energija udara te dvije različite visine stijenke. Numerička analiza izvršit će se u programu Abaqus/Explicit. Materijalni model za NOMEX uzima se iz [9], a za vanjske kompozitne slojeve preuzeti su iz [5]. Teorija potrebna za obavljanje zadatka većinom se temeljila na [12]. Podaci za validaciju rješenja preuzeti su iz [9], odnosno iz [10]. Na kraju, potrebno je na temelju iskustva steknutog pisanjem ovog rada donijeti zaključak o različitim izvedbama sendvič konstrukcija.

3 Numerički modeli

3.1. Mehanička svojstva vanjskih slojeva i jezgre

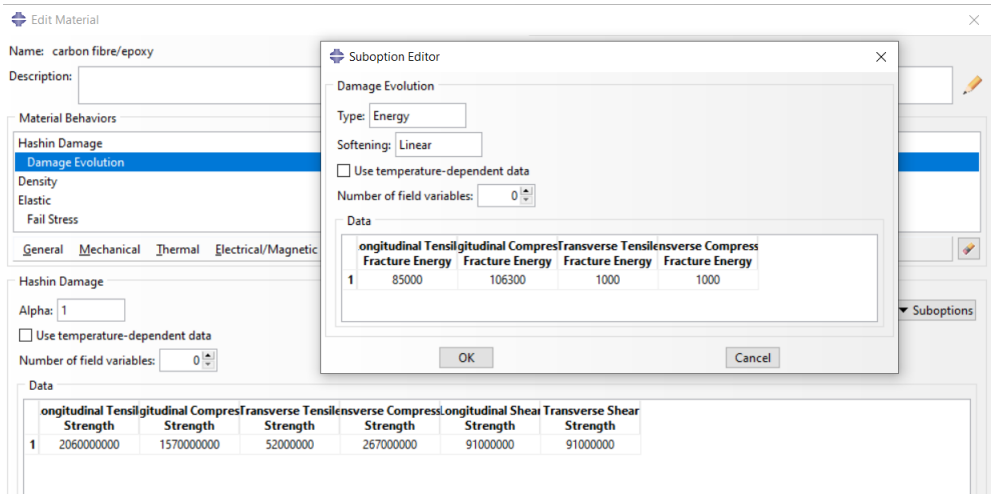
3.1.1. Mehanička svojstva vanjskih slojeva

Za materijal kompozitnih slojeva odabrana je ugljična tkanina (eng. *Woven*) materijal. Hashinov kriterij koji se koristio u radu vrijedi za jednoosno orijentirane kompozite. Kako ovaj materijal to nije, aproksimirao se kompozitom koji je načinjen od više jednakih slojeva. Razlog za to je što naš računalni model bolje pokriva jednousmjerena vlakna nego što to radi za tkanine, pa je model koji je opisan sa više takvih slojeva poželjniji pri ovakvoj analizi. Svojstva su dana u tablici 3.1. Materijalni model je zadan kao linearno elastičan sve do popuštanja koje se određuje primjenom Hashinovog kriterija. Broj slojeva nije zadan pa se zbog jednostavnije usporedbe s dostupnim podacima odabrala debljina sloja od 0.12 mm, a broj slojeva je 10. Slojevi su orijentirani naizmjenično za 0^o te 90^o. Model je širok te dug 120 mm.

Zadavanje mehaničkih svojstava materijala vanjskih slojeva opisano je slikom 3.1. Vrijednosti su preuzete iz [8] a to su mehanička svojstva za model oštećivanja koji je u Abaqusu povezan s Hashinovim kriterijem popuštanja.

Tablica 3.1: Mehanička svojstva vanjskih slojeva

E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	ν_{12} (-)	ν_{13} (-)	G_{12} (GPa)	G_{13} (GPa)	X_T (MPa)	X_C (MPa)	Y_T (MPa)	Y_C (MPa)	S (MPa)	ρ (kg/m^3)
135	9,1	0,22	0,49	4,8	4,8	2060	1570	52	267	91	1600



Slika 3.1: Mehanička svojstva materijala vanjskih slojeva [8]

Tablica 3.2: Hashin parametri vanjskih slojeva

Uzdužna vlačna energija loma (J)	Uzdužna tlačna energija loma (J)	Poprečna vlačna energija loma (J)	Poprečna tlačna energija loma (J)
85000	106300	1000	1000

3.1.2. Mehanička svojstva jezgre

Za materijal jezgre uzet je NOMEX oznake HRN-10-1/8-3.0 debljine 10 mm. Svojstva materijala preuzeta su s [15]. Veličina čelije te ostale dimenzije odabrane su zbog dostupnih materijala, a mogu se iščitati iz oznake materijala. Vrijednost 1/8 označava debljinu u inčima, a 3.0 gustoću u funtama po kvadratnoj stopi.
Vrijednosti iz [15] odnose se na homogenizirani materijal, pa su se vrijednosti određenih svojstava morala prilagoditi saćastoj strukturi jezgre. To je učinjeno na način da se krutost postavila na $E = 138$ MPa [9], čvrstoća na $\sigma_p = 17$ MPa te $\sigma_c = 37$ MPa, a deformacija na $\epsilon = 0,03$ po vrijednostima iz [16].
Mehanička svojstva jezgre prikazana su u SI jedinicama u tablici 3.3.

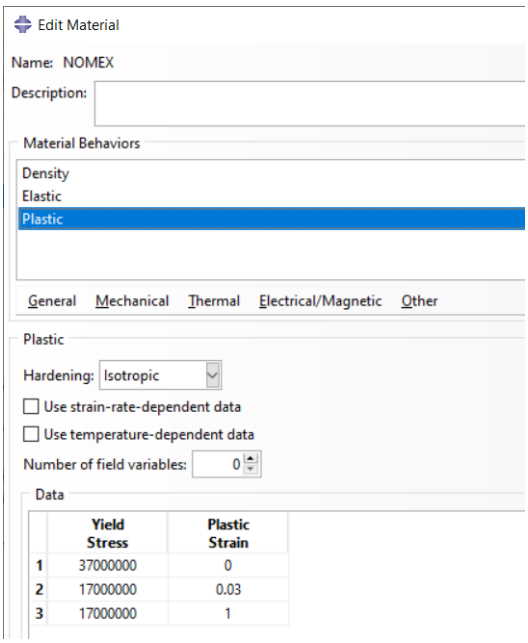
Tablica 3.3: Mehanička svojstva jezgre

E (MPa)	σ_Y(MPa)	σ_p(MPa)	σ_c(MPa)	$\epsilon(-)$	ρ (kg/m^3)
138	2,24	17	37	0.03	48

,

Vrijednosti mehaničkih svojstava materijala unesene su u sekciji *property*, a dodane su kao svojstva materijala. Nakon što je definirana gustoća, u elastičnom dijelu bilo je

potrebno definirati modul elastičnosti te Poissonov koeficijent, a u plastičnom dijelu granice elastičnosti te plastično naprezanje kako prikazuje slika 3.2. Vrijednost σ_c označava naprezanje platoa, odnosno granicu plastičnosti. To je naprezanje kod kojeg započinje intenzivnija plastična deformacija materijala. σ_c označava naprezanje kolapsa.



Slika 3.2: Mehanička svojstva materijala jezgre

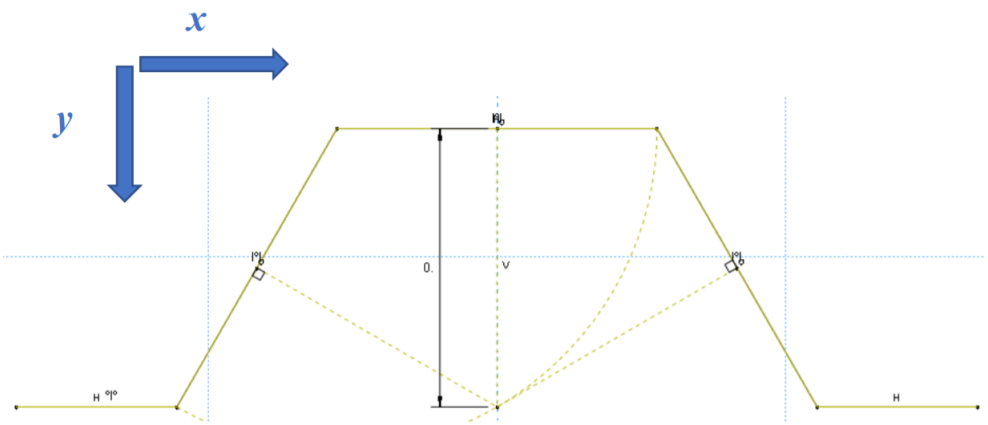
3.2. Model geometrije saća

Same dimenzije ćelije definirane su po već navedenim svojstvima materijala. Kako bi se izbjegle eventualne poteškoće u prijenosu datoteka iz jednog CAD programa u drugi, geometrija je modelirana izravno u programu Abaqus/CAE u kojem se i vršila analiza. Kako bi se pojednostavnilo modeliranje numeričkog modela jezgre, uvedene su određene pretpostavke. Uklonjena je dvostruka stijenka koja nastaje prilikom proizvodnje kao posljedica sklapanja dvaju nizova polovica heksagona na mjestu gdje se spomenuti nizovi spajaju.

Također, jezgra je modelirana kao heksagon, što ne odgovara stvarnom slučaju.

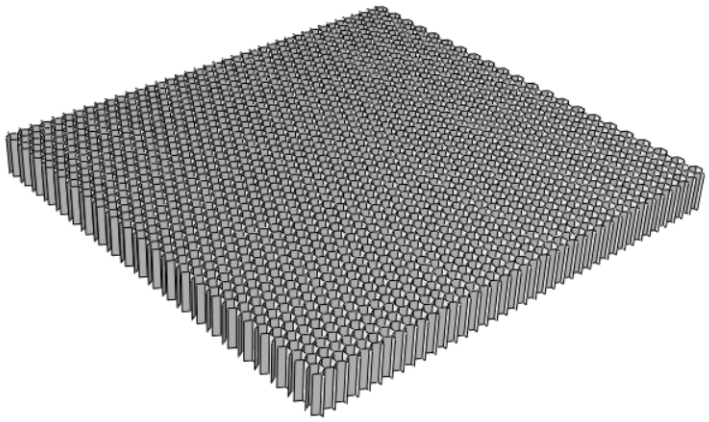
Treća i najveća pretpostavka jest da je za model pretpostavljeno linearno-elastično ponašanje. To se pak objašnjava činjenicom da je opterećenje u samo jednom smjeru pa

se može aproksimirati linearno - elastičnim modelom. Vrijednosti materijalnog modela uzete su iz rada kolege Markulina [9] koji je već napravio aproksimaciju te prilagodio vrijednosti kako bi one što vjernije odgovarale eksperimentalnim rezultatima.
Na slici 3.3 prikazana je skica polovice saće konstrukcije, a dimenzije su opisane u poglavlju o materijalu same jezgre.



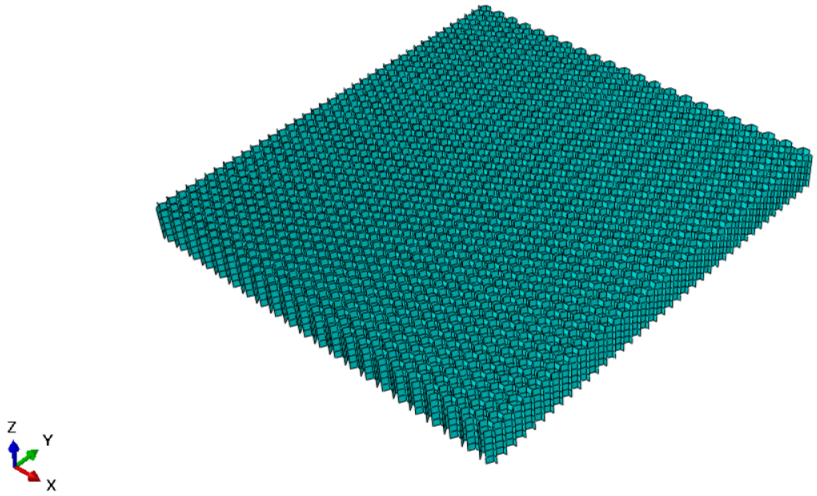
Slika 3.3: Geometrija polovice saćaste jezgre [9]

Slika 3.4 prikazuje gotov model, *part* saćaste jezgre, debljine stijenke 0.1 mm



Slika 3.4: Model saćaste jezgre, 120 mm x120 mm x10 mm

Mreža elemenata saćaste jezgre sastoji se od 30 800 S4R elemenata, a prikazana je na slici 3.5.

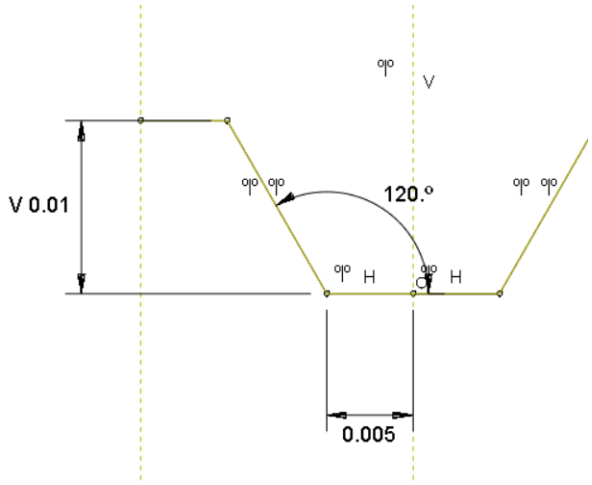


Slika 3.5: Mreža elemenata saćaste jezgre

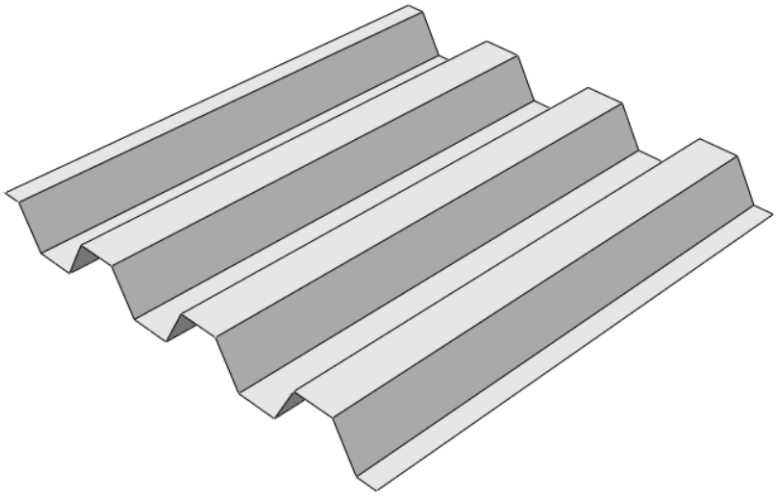
3.3. Model geometrije trapeza

Dimenzije su odabrane na način da visina trapeza odgovara udaljenosti između slojeva kompozitnih ploča, karakteristični kut je odabran od 60^o jer je takva izvedba često korištena u industriji, a sama širina horizontalnog dijela je određena na način da također odgovara udaljenosti između slojeva kompozitnih ploča.
Debljina stijenke je uvećana pet puta kako bi se ostvarila približno jednaka masa trapezne jezgre i saćaste jezgre. Slika prikazuje crtež trapezne geometrije debljine stijenke 0,5 mm,
Slika 3.7 prikazuje gotov model, *part* trapezne jezgre.

Mreža elemenata trapezne jezgre sastoji se od 5002 S4R elemenata, a prikazana je na slici 3.8.



Slika 3.6: Crtež trapezne geometrije

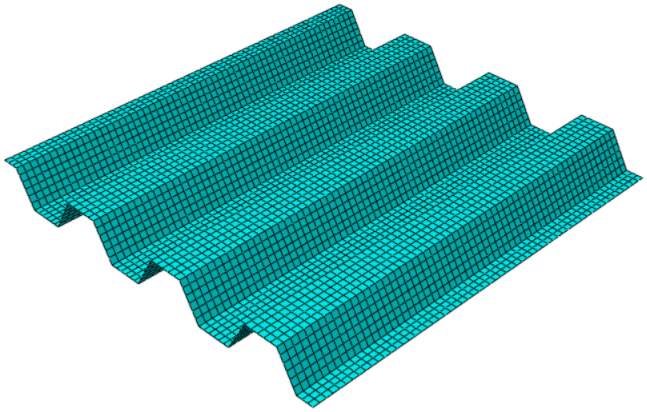


Slika 3.7: Model trapezne jezgre

3.4. Model geometrije trokuta

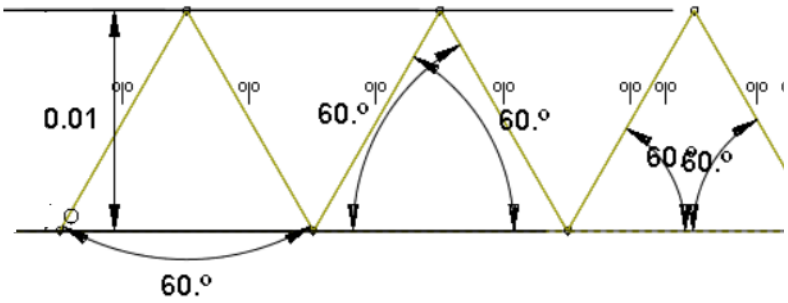
Dimenzije trokuta su odabrane na način da visina trokuta odgovara udaljenosti između kompozitnih ploča, a karakteristični kut je, isto kao i kod trapezne izvedbe, odabran 60^o.

Iz istog razloga kao i za trapeznu geometriju, i ovdje je povećana debljinu stijenke, no ovaj put s faktorom od 1,5 kako bi se postigla približna masu kao kod prethodnih izvedbi



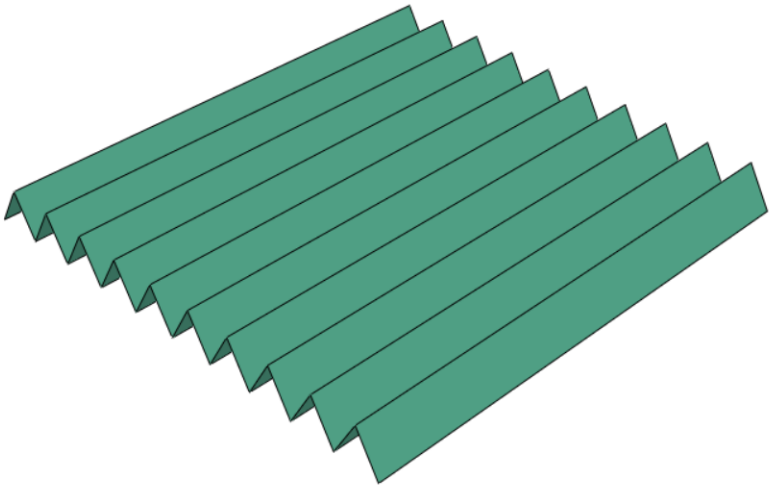
Slika 3.8: Mreža elemenata trapezne jezgre

jezgre. Ciljano su odabrane velike sličnosti s trapeznom izvedbom kako bi se rezultati mogli što vjerodostojnije usporediti. Odabrana rešetkasta geometrija mogla se dobiti i uklanjanjem horizontalnog dijela s crteža za trapeznu geometriju, no pristup modeliranja od nule se pokazao bržim i jednostavnijim.
Slika 3.9 prikazuje geometriju trokutne jezgre.



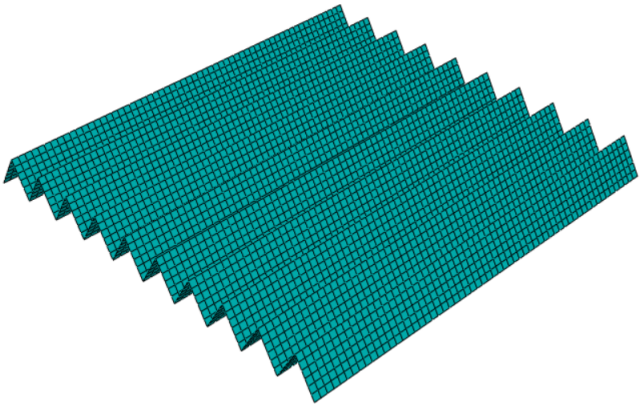
Slika 3.9: Geometrija trokutne jezgre, dimenziju u [m]

Slika 3.10 prikazuje gotov model, *part* trokutne jezgre:



Slika 3.10: Model trokutne jezgre

Mreža elemenata saćaste jezgre sastoji se od 7 200 S4R elemenata, a prikazana je na slici 3.12. Debljina stijenke je 0,15 mm.



Slika 3.11: Mreža elemenata trokutne jezgre

S4R su 2D ljuskasti elementi sa 4 čvora i 6 stupnjeva slobode po čvoru.
Vanjski slojevi modelirani su pomoću SC8R elemenata. Oni su 3D ljuskasti elementi s 8 čvorova i 3 stupnja slobode po čvoru.
Jezgra je modelirana kao 3D *Shell* tijelo, koristeći opciju *extrude* s debljinom stijenke od 0.1 mm za saćastu geometriju, 0.5 mm za trapeznu te 0.15 mm za trokutastu.
Za sve modele korišteni su isti vanjski slojevi. To omogućuje vjerodostojniju usporedbu

različitih izvedbi jezgre.

Nakon modeliranja ploče i jezgre, dodijeljivanja svojstava materijalima, potrebno je odrediti veze među komponentama. U stvarnosti se ploče i jezgra spajaju adhezivima, u numeričkoj analizi takav nepomični spoj možemo definirati preko opcije *Tie* koja ih povezuje kao jedno tijelo.
Tablica 3.4 prikazuje usporedbu određenih parametara modela:

Konstrukcija	Broj elemenata	Broj čvorova	Masa cijelog modela bez udarača [kg]
Saće	32 561	29 816	0,04
Trapez	9 931	11 174	0,04
Trokut	9 051	10 293	0,04

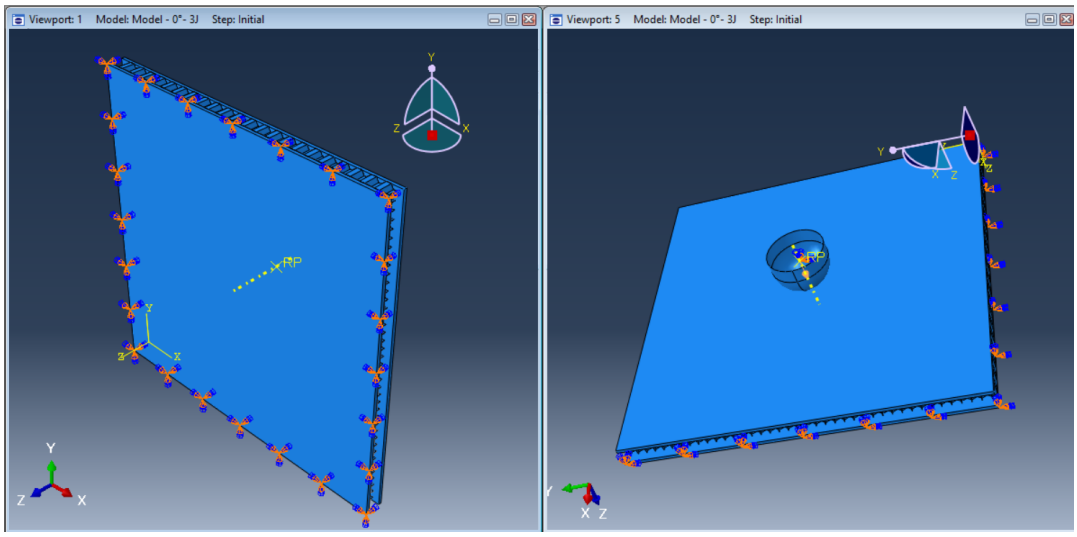
Tablica 3.4: Usporedba računalnih modela

3.5. Rubni uvjeti

Kao rubne uvjete zadana su ograničenja gibanja, odnosno pomaka na donjim rubovima. Svi pomaci na donjim rubovima su onemogućeni.
To jest, pretpostavlja se uklještenje donjih bridova vanjskog ruba te omogućilo gibanje udarača samo po vertikalnoj osi.

3.6. Opterećenje

U ovom radu modelirat će se tri različite energije udara (3J, 7J i 10J), te dvije različite visine jezgre (5 mm i 10 mm) za tri različite izvedbe jezgre.
Sve skupa 18 kombinacija.
Udarač je modeliran kao kruto tijelo u obliku kugle dimentija ϕ 20mm, mase 3,62 kg te inercijom u središtu. Modeliran je kao 3D *Shell* element pomoću opcije *Revolution*.
Udaraču je dozvoljeno gibanje u samo jednoj osi, a brzinu određujemo iz jednadžbe za kinetičku energiju. Za zadane energije od 3 J,7 J i 10 J dobiju se brzine od 1,287 m/s, 1,967 m/s i 2,351 m/s.

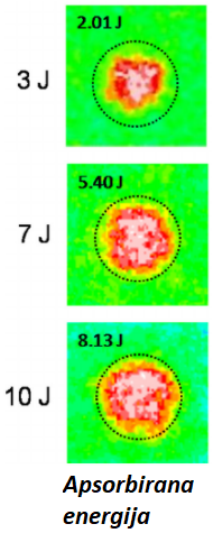


Slika 3.12: Rubni uvjeti; a) uklještenje po donjim rubovima b) omogućeno gibanje samo po vertikalnoj osi

Kontakt između udarača i konstrukcije modeliran je korištenjem *General contact* opcije u Abaqusu.
Korišten je Abaqus/Explicit rješavač. Analize su trajale oko 10 minuta.

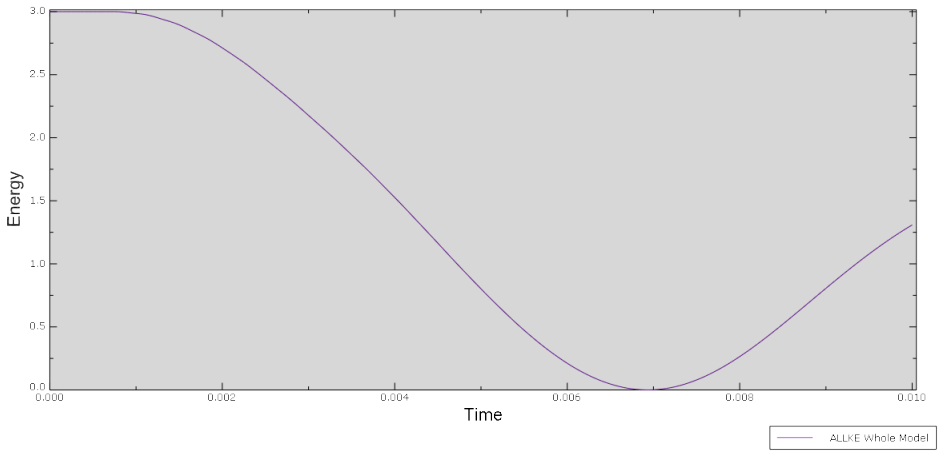
4 Validacija numeričkog modela

Iz [10] dostupni su eksperimentalni podaci za saćastu konstrukciju visine 10 mm te za energije udara od 3 J,7 J i 10 J.
Podaci su prikazani na slici 4.1.



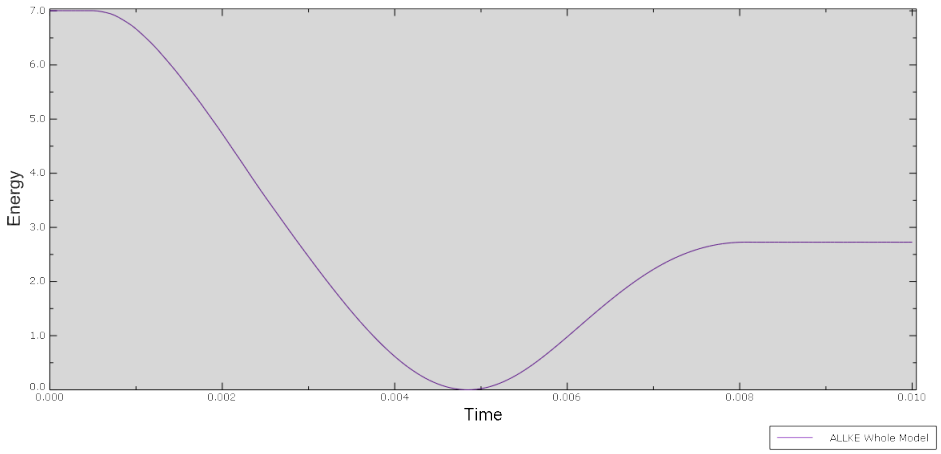
Slika 4.1: Eksperimentalni rezultati apsorbirane energije [10]

Za numerički model saćaste konstrukcije visine 10 mm dobiveni su sljedeći rezultati.
Razlika između kinetičke energije na početku i one na kraju jednaka je apsorbiranoj energiji.
U prvom slučaju numeričke simulacije 4.2, za energiju udara od 3 J, dobije se da je



Slika 4.2: Kinetička energija udara od 3 J

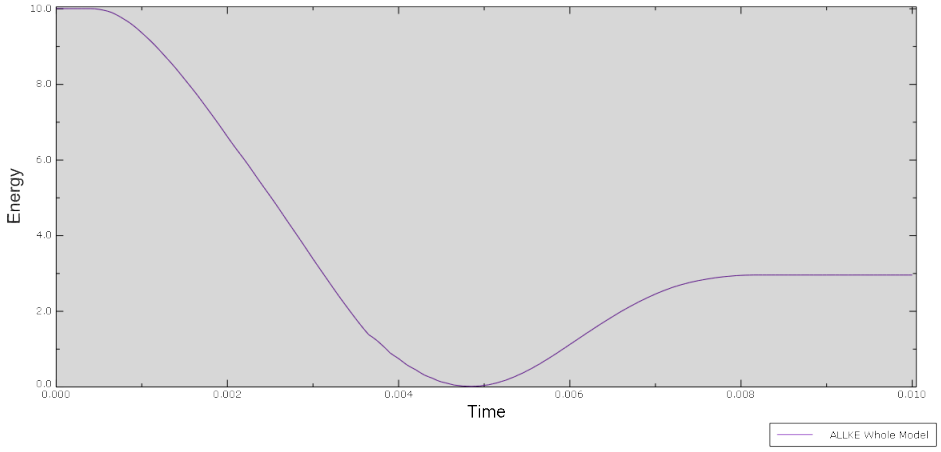
apsorbirano 1,74 J, što je relativno blizu eksperimentalnom rezultatu od 2,01 J. To je odstupanje od 13,4 % .



Slika 4.3: Kinetička energija udara od 7 J

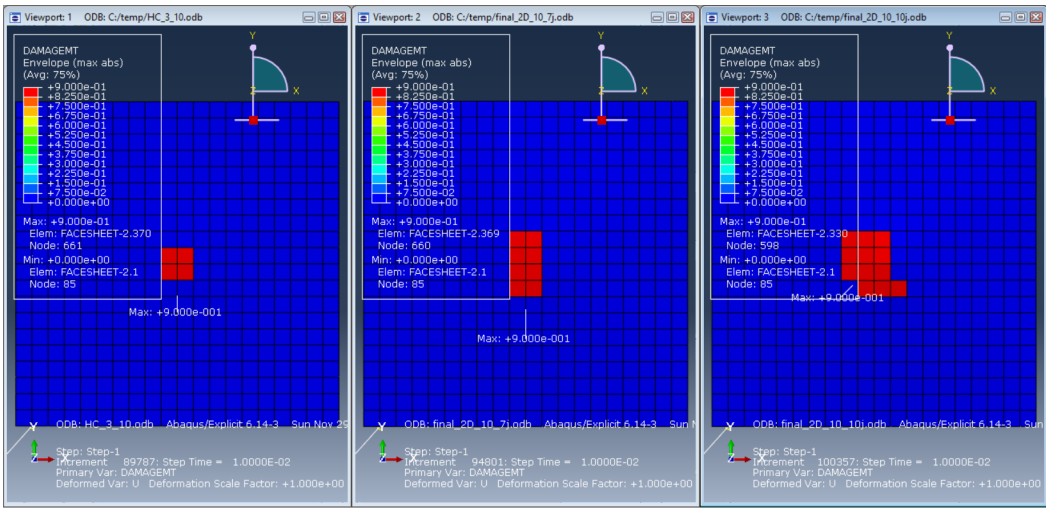
U drugom slučaju, za energiju udara od 7 J, numerički model 4.3 nam govori da se apsorbira 4,45 J, a eksperimentalni podaci 5,40 J. To je odstupanje od 17,6 % .

U trećem slučaju, za energiju udara od 10 J, numerički model 4.4 daje iznos apsorbirane energije od 7,1 J, a eksperimentalni podaci u iznosu od 8,13 J. To je odstupanje od 12,7 % .

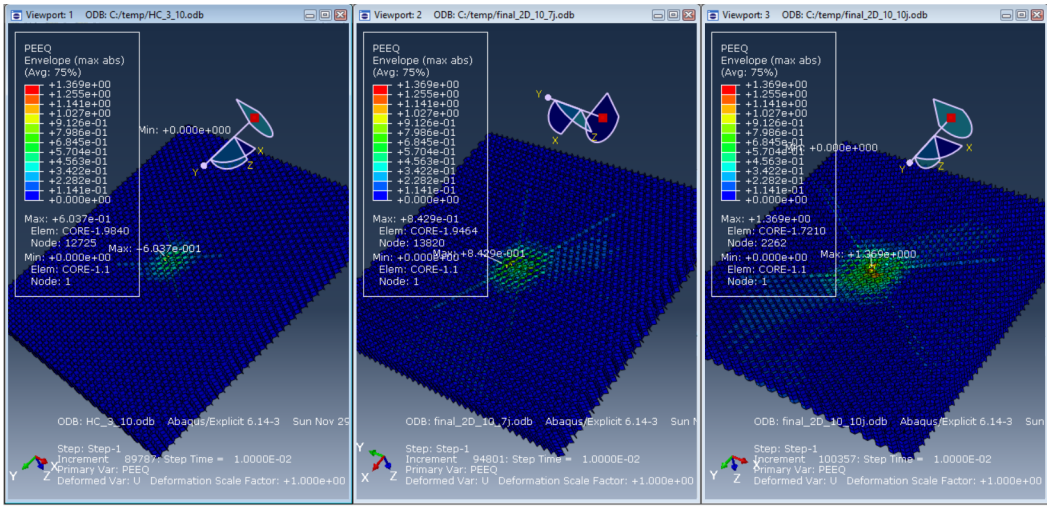


Slika 4.4: Kinetička energija udara od 10 J

Slika 4.5 prikazuje raspodjelu parametara oštećenja vlačnog popuštanja matrice za sve tri izvedbe: Vidljivo jest da se povećanjem energije udara proširuje i zona oštećenja. Nije bilo potrebe prikazivati ostale mehanizme disipacije energije u vanjskim slojevima jer je GMT jedini kriterij u kojem je dolazilo do oštećenja.
Slika 4.6 prikazuje raspodjelu PEEQ, odnosno ekvivalent plastičnih deformacija. Odstupanje nije zanemarivo, no rezultati su dovoljno točni da bi se mogla donijeti gruba procjena ponašanja različitih izvedbi.

[h] 

Slika 4.5: Parametri vlačnog oštećenja matrice kompozita kompozita za energije udara od a) 3 J, b) 7 J i c) 10 J



Slika 4.6: Raspodjela ekvivalentnih plastičnih deformacija jezgre u saćastom sendvič kompozitu za energije udara od a) 3 J, b) 7 J i c) 10 J

5 Rezultati

Rezultati će biti kategorizirani na način da se uvijek uspoređuju sve tri izvedbe s jednakim preostalim parametrima. Tako će se rezultati varirati u ovisnosti o energiji udara kao i visini jezgre. Uvijek će se prikazivati, redom s lijeva na desno; saćasta, trapezna pa trokutasta izvedba.

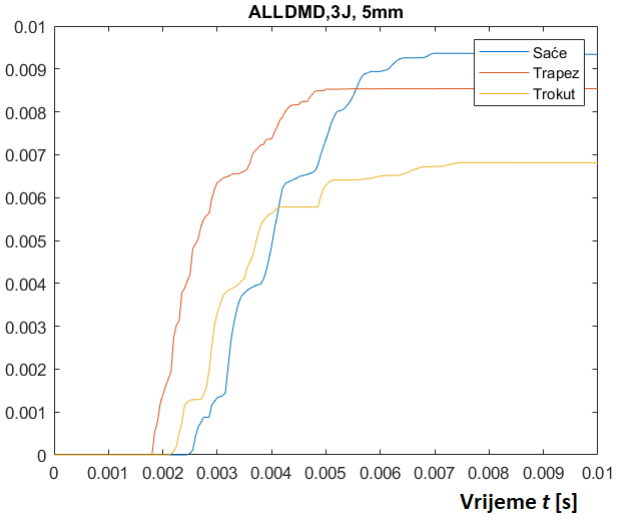
5.1. ALLDMD - Energija disipirana oštećenjem

Označava energiju koja se disipirala prilikom nastanka oštećenja. U ovom slučaju, opisuje energiju koju su na sebe preuzeli vanjski, kompozitni slojevi jer materijal jezgre nema oštećivanje u konstituitivnom modelu već plastičnost.

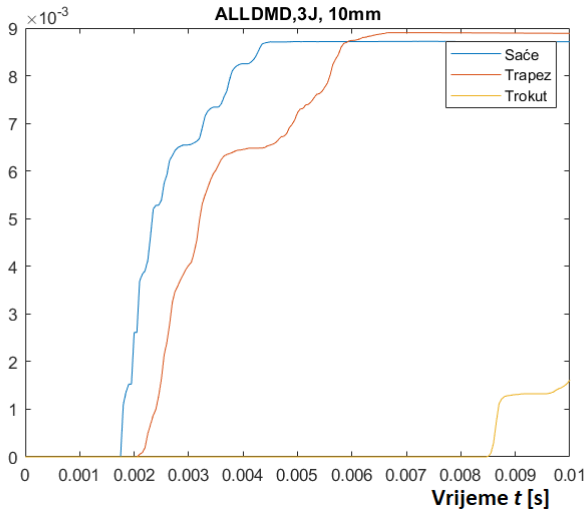
5.1.1. Energija udara 3 J

Iz slike 5.1 vidljivo jest da jezgra trokutne konstrukcije apsorbira manje energije nego li saćasta ili trapezna.
U prvom dijelu simulacije nema značajnije razlike, no nakon što dođe do izvijanja stijenke trokutaste konstrukcije, ona naglo gubi mogućnost apsorbiranja energije.

Na slici 5.2 ta razlika postaje još uočljivija.
Saćasta i trapezna konstrukcija zadržavaju mogućnost apsorpcije energije udara do višestruko viših vrijednosti nego što to uspijeva trokutasta konstrukcija. Slika 5.3 pokazuje kako u raspodjeli energije apsorbirane vanjskim slojeva nema drastičnijih razlika.



Slika 5.1: ALLDMD pri energiji udara od 3 J i visini jezgre od 5 mm

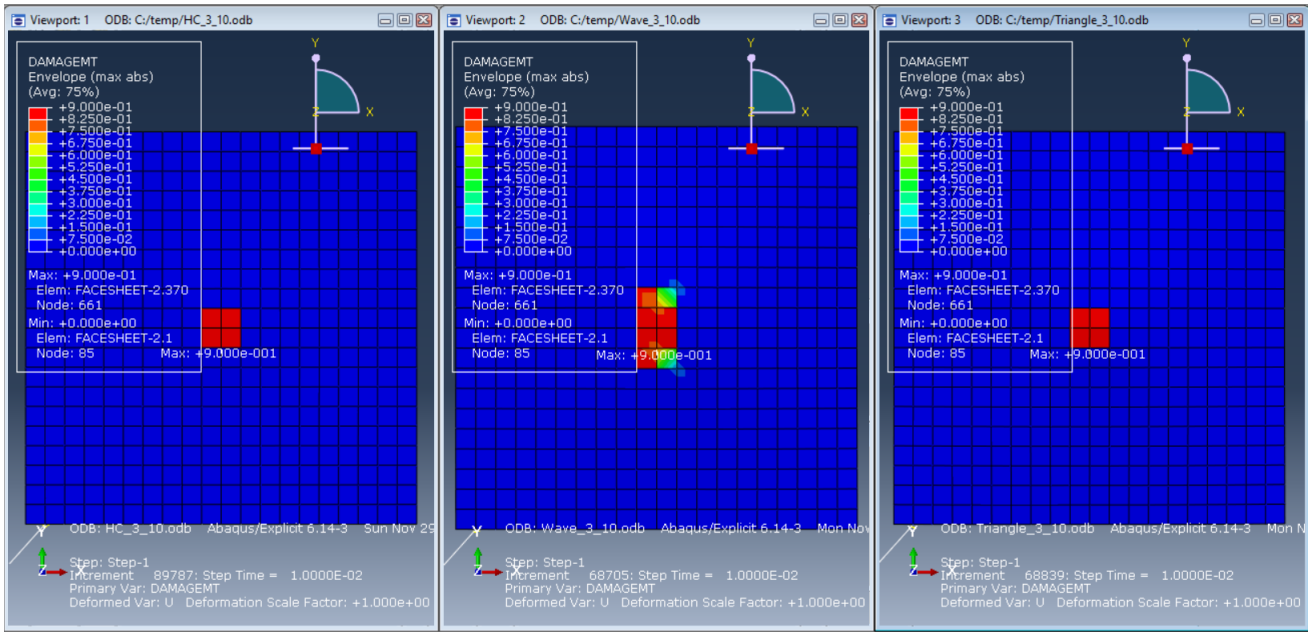


Slika 5.2: ALLDMD pri energiji udara od 3 J i visini jezgre od 10 mm

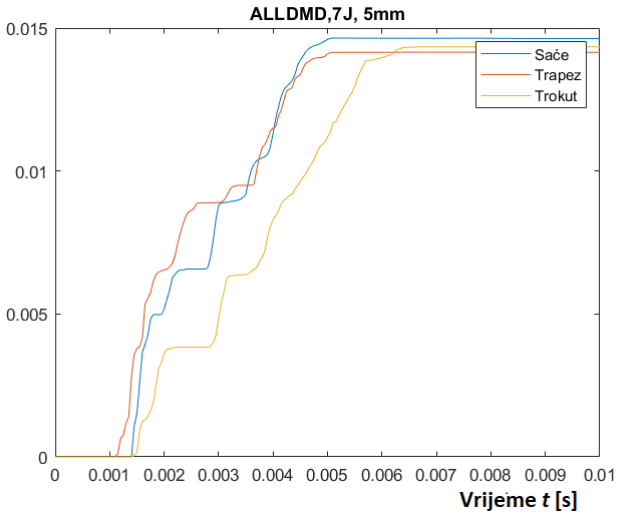
5.1.2. Energija udara 7 J

Na slici 5.4 trokutna jezgra uspijeva apsorbirati podjednaku količinu energije kao saćasta i trapezna.

Na slici 5.5 je vidljivo da trokutasta jezgra usprkos početnom zaostatku, na kraju ipak uspijeva apsorbirati gotovo jednaku količinu energije udara.

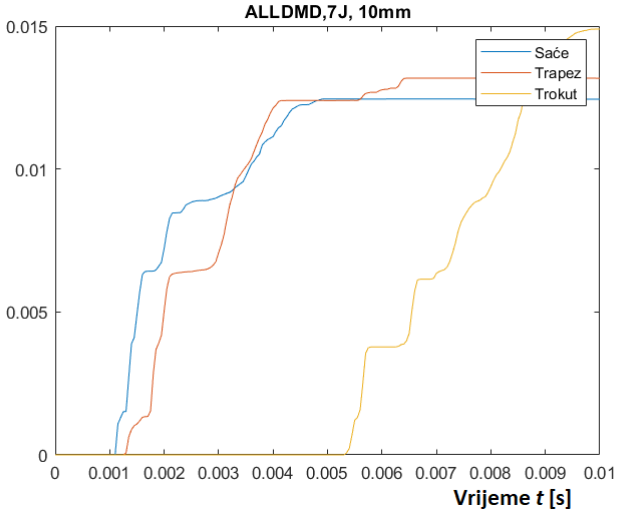


Slika 5.3: Raspodjela parametara opterećenja vlačnog popuštanja matrice pri energiji udara od 3 J i visinu jezgre od 10 mm



Slika 5.4: ALLDMD pri energiji udara od 7 J i visini jezgre od 5 mm

Slike 5.6 te 5.7 prikazuju elemente kod kojih je došlo do oštećenja, odnosno elemente koju su apsorbirali dio energije oštećenjem.

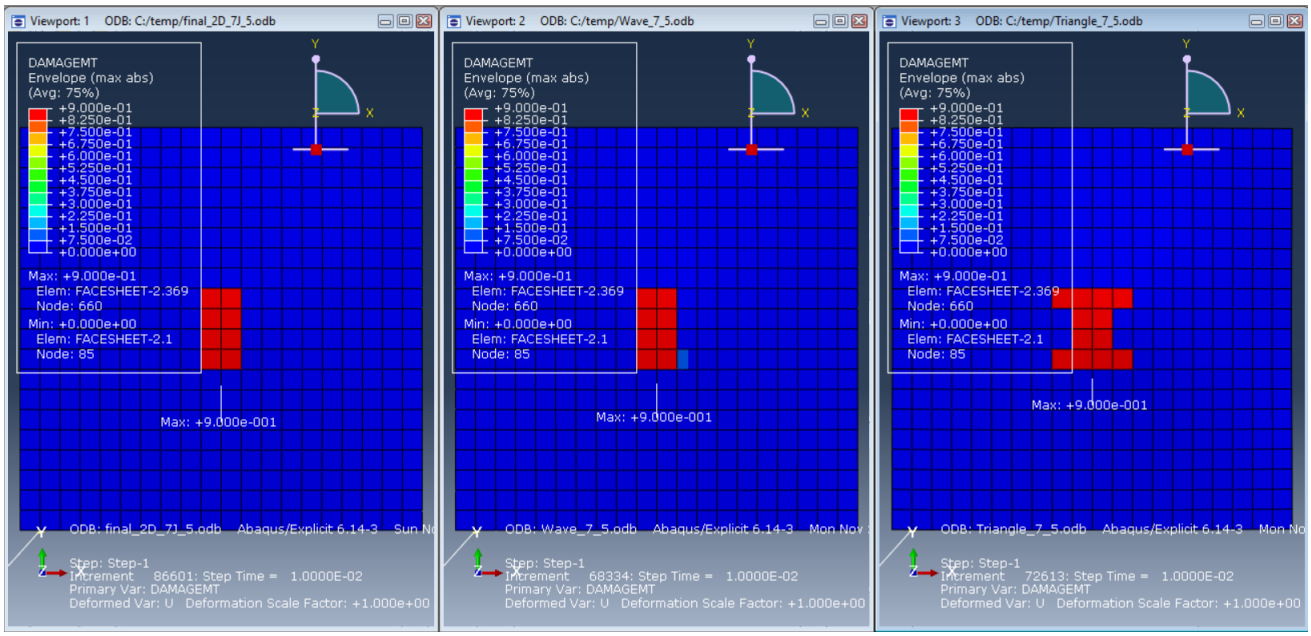


Slika 5.5: ALLDMD pri energiji udara od 7 J i visini od 10 mm

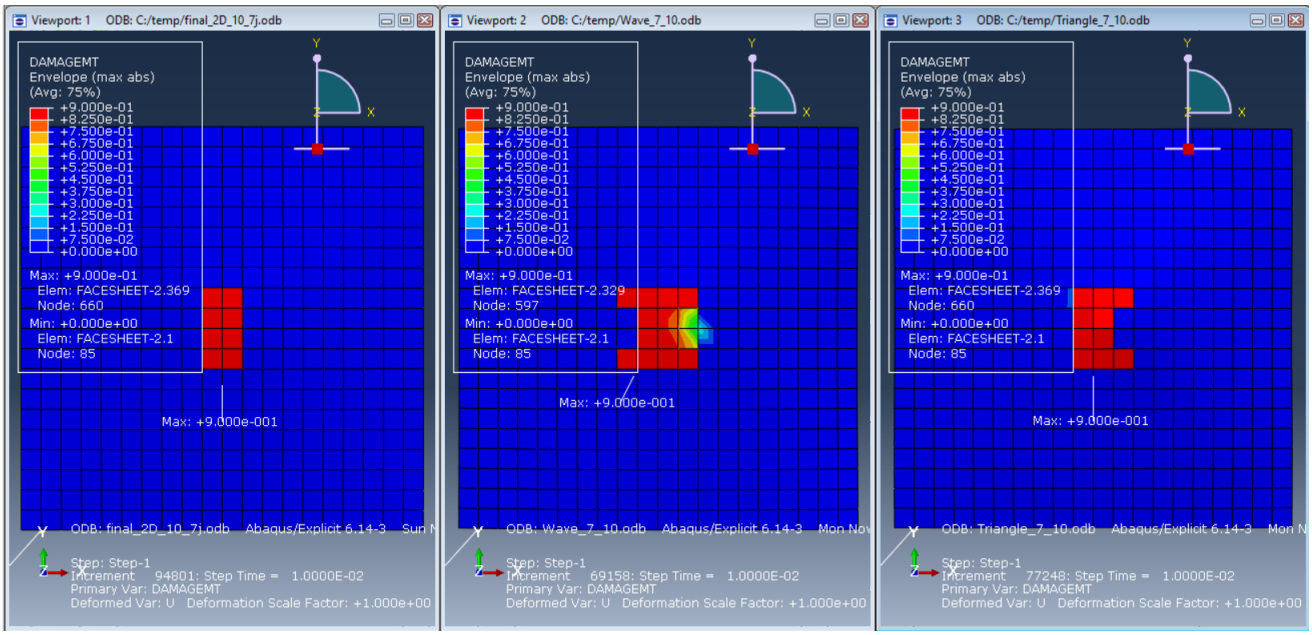
5.1.3. Energija udara 10 J

Slike 5.10 i 5.11 nam pokazuju elemente koji su sudjelovali u apsorbiranju energije, odnosno elemente koji su pridonijeli stvaranju ALLDMD. Bitno je napomenuti da kod veće energije udara kao što je 10 J, javljaju se i druga oštećenja koja disipiraju energiju, a to su:

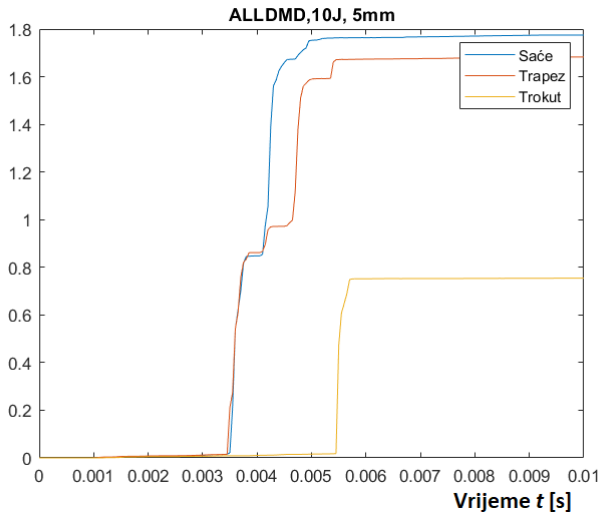
Javlja se također i tlačno oštećenje matrice koje također disipira energiju:



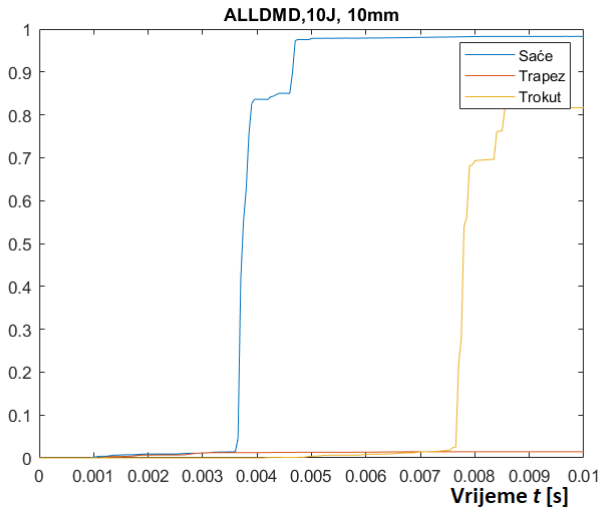
Slika 5.6: Raspodjela parametara opterećenja vlačnog popuštanja matrice pri energiji udara od 7 J i visini od 5 mm



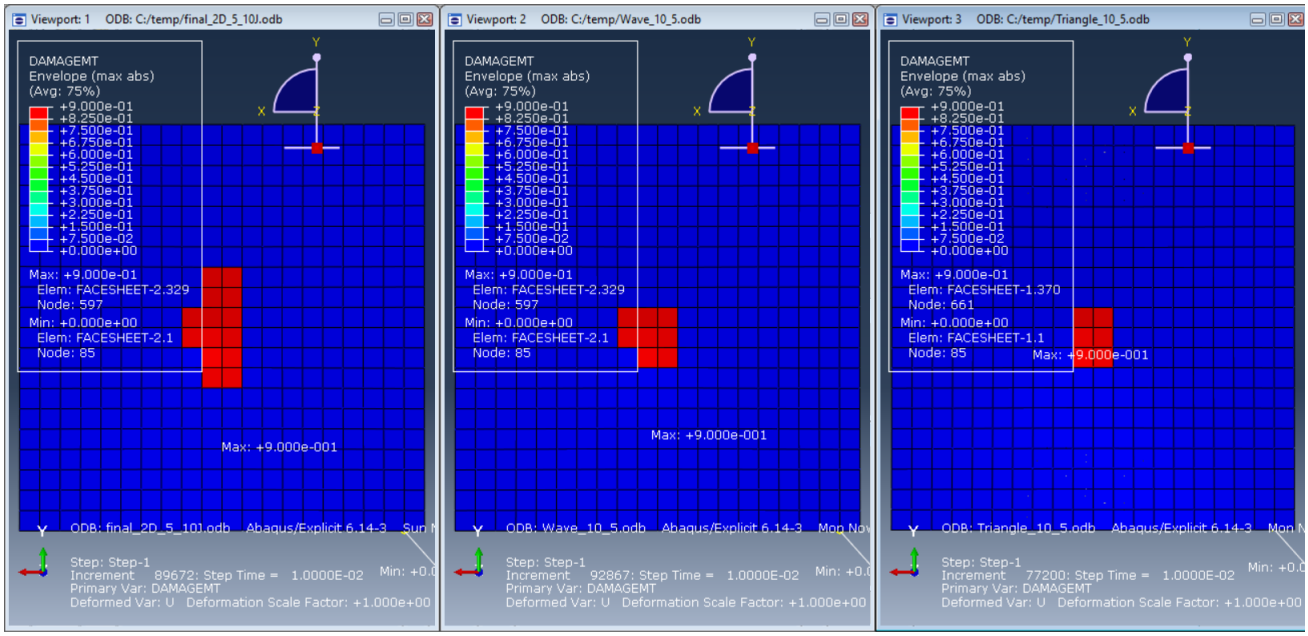
Slika 5.7: Raspodjela parametara opterećenja vlačnog popuštanja matrice pri energiji udara od 7 J i visini od 10 mm



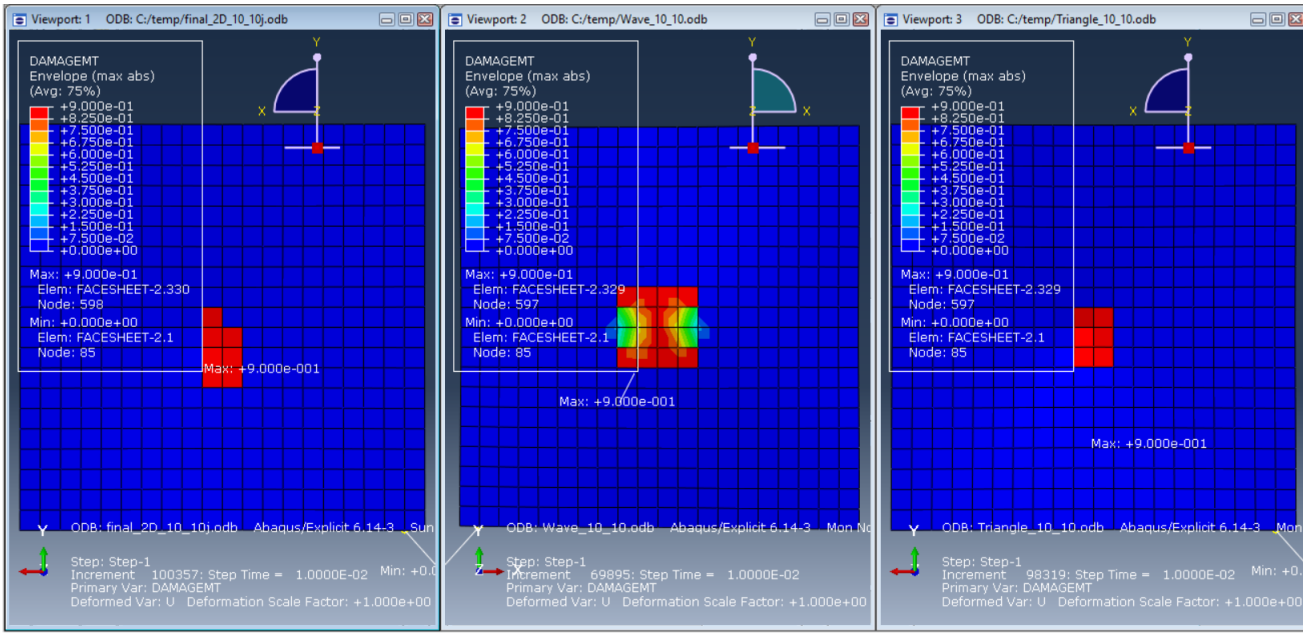
Slika 5.8: ALLDMD pri energiji udara od 10 J i visini jezgre od 5 mm



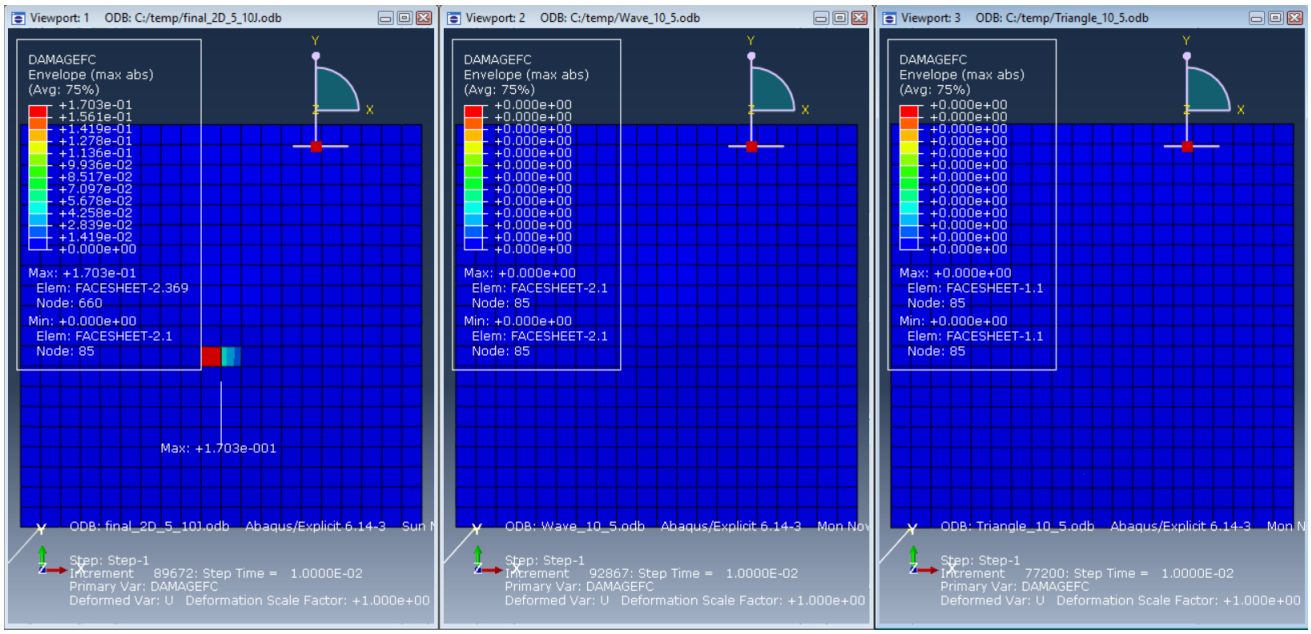
Slika 5.9: ALLDMD pri energiji udara od 10 J i visini jezgre od 10 mm



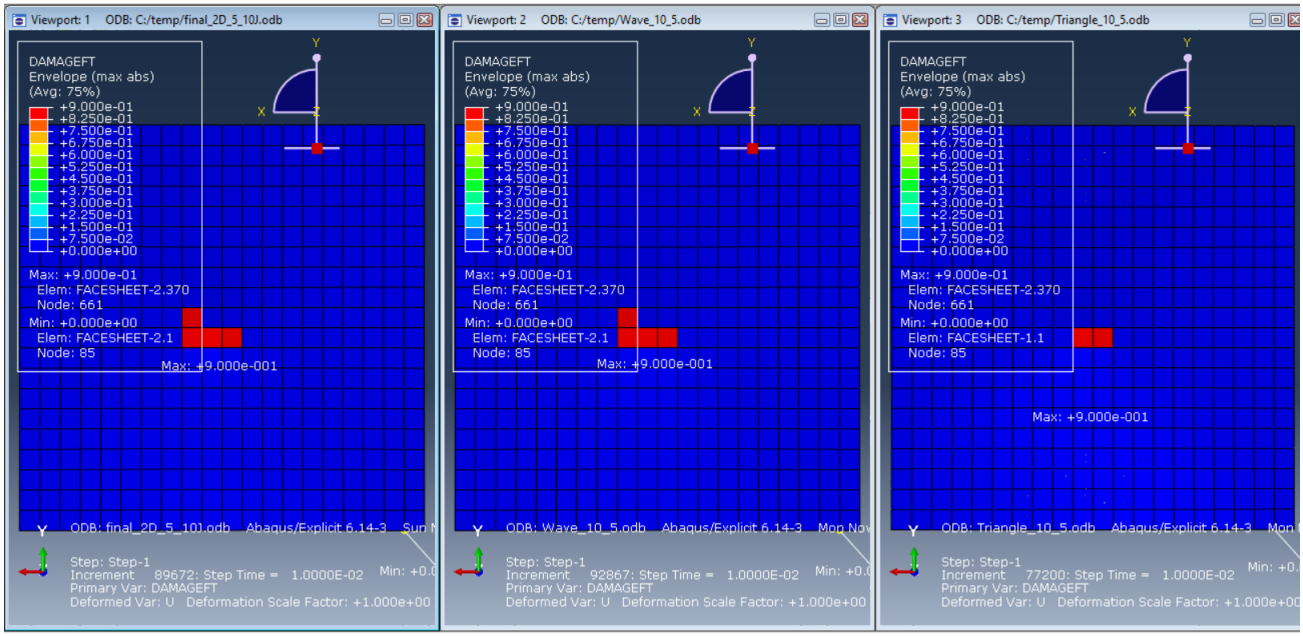
Slika 5.10: Raspodjela parametara opterećenja vlačnog popuštanja matrice pri energiji udara od 10 J i visini od 5 mm



Slika 5.11: Raspodjela parametara opterećenja vlačnog popuštanja matrice pri energiji udara od 10 J i visini od 10 mm

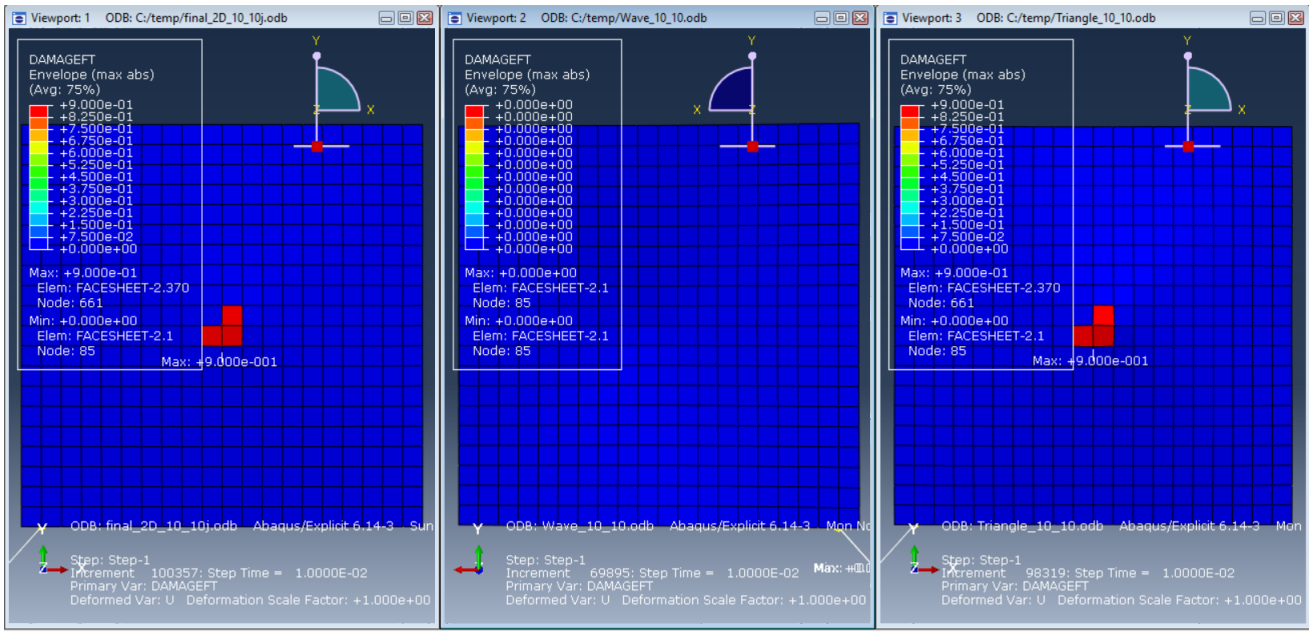


Slika 5.12: Raspodjela parametara opterećenja tlačnog popuštanja vlakana

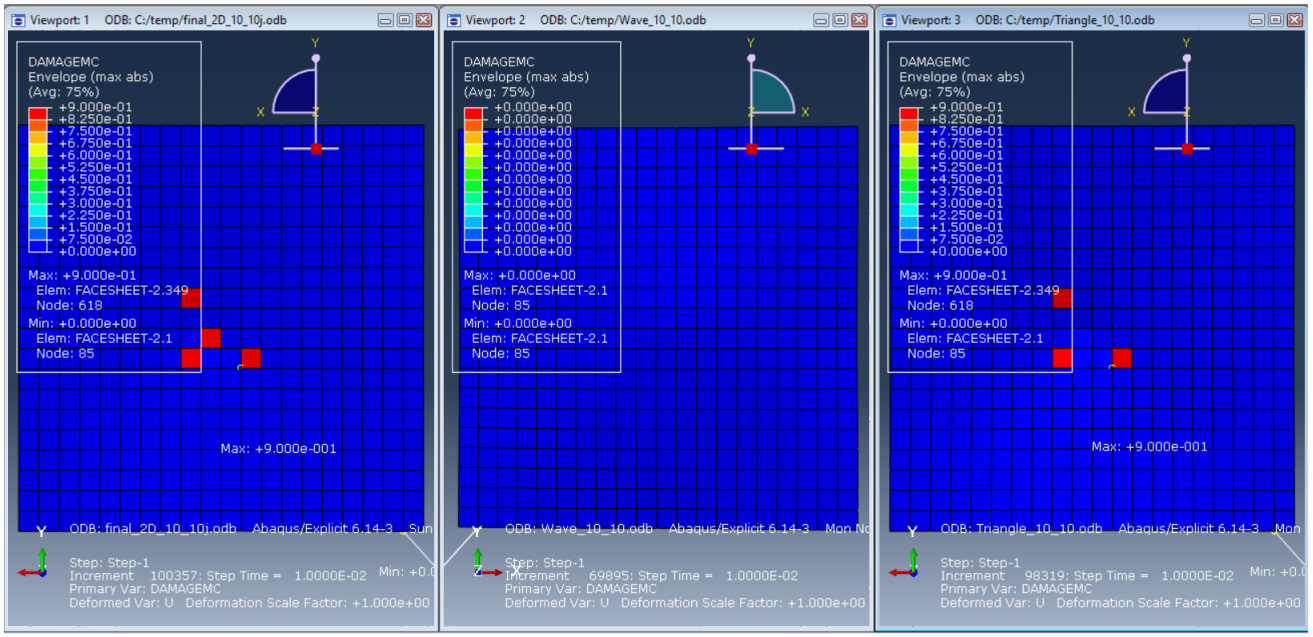


Slika 5.13: Raspodjela parametara opterećenja vlačnog popuštanja vlakana

Iz rezultata prikazanih u prethodnim slikama, vidljivo je da u sendvič kompozitima s trokutnom jezgrom kasnije dođe do preuzimanja energija putem vanjskih slojeva, nego što je slučaj kod sačaste i trapezne konstrukcije. Razlog za to može se pronaći u maloj



Slika 5.14: Raspodjela parametara opterećenja vlačnog popuštanja vlakana, pri energiji udara od 10 J i visini jezgre od 10 mm



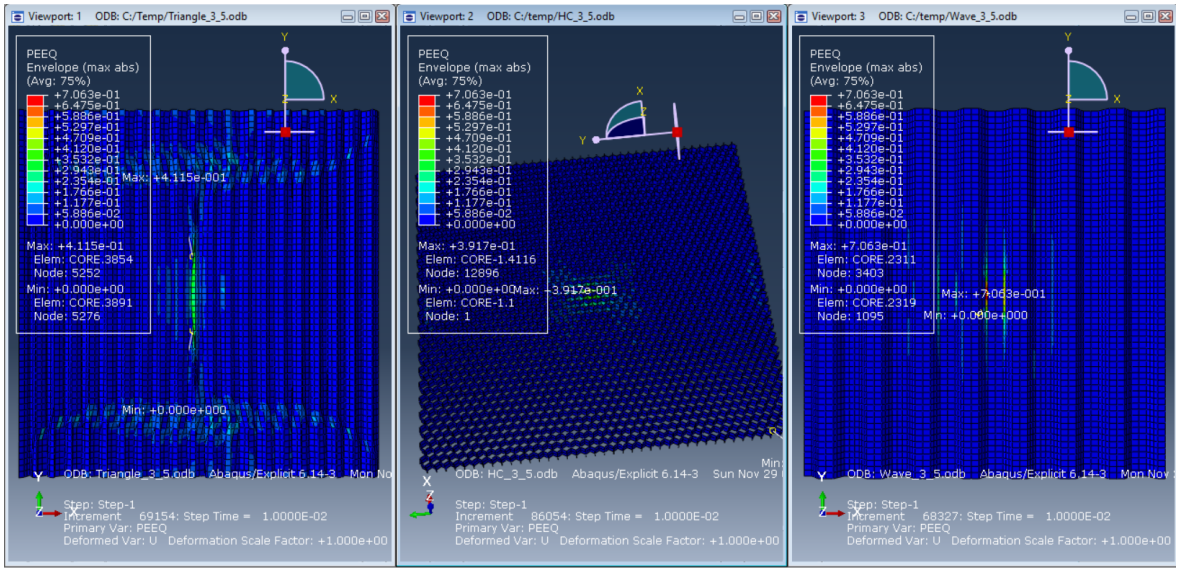
Slika 5.15: Raspodjela parametara opterećenja tlačnog popuštanja matrice, pri energiji udara od 10 J i visini jezgre od 10 mm

krutosti jezgre, odnosno činjenici da takva jezgra pri velikoj visini jako lako gubi stabilnost te dolazi do izvijanja. To izvijanje pak na sebe preuzme dio energije udara što u konačnici odgodi apsorpciju energije na vanjske slojeve sve do trenutka kada jezgra ne može primiti više energije.
Za manju visinu jezgre, odnosno za visinu od 5 mm, nema značajnih razlika između odabranih opcija.

5.2. ALLPD - Energija disipirana plastičnom deformacijom

Označava energiju koja se disipirala prilikom plastičih deformacija. U ovoj analizi to se prvenstveno odnosi na energiju koja se disipirala djelovanjem jezgre.
Ovakva usporedba nam može dati dobar uvid u sposobnosti apsorbiranja energije za svaku pojedinu izvedbu jezgre.

5.2.1. Energija udara 3 J



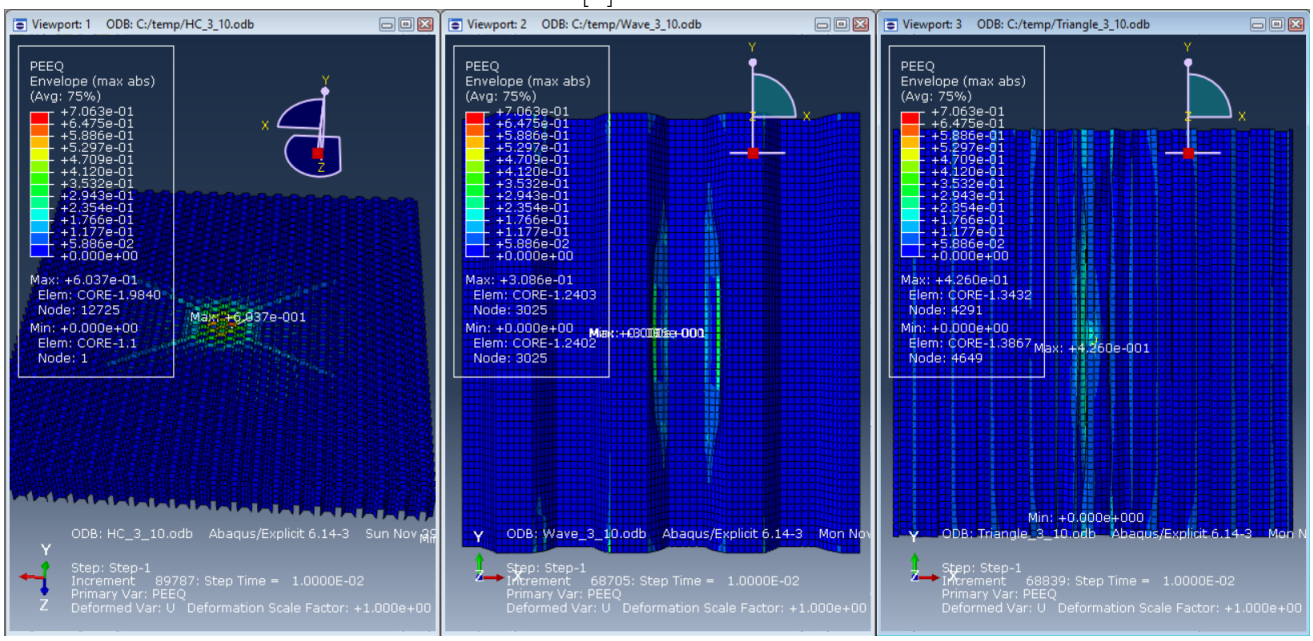
Slika 5.16: Raspodjela ekvivalentne plastične deformacije za energiju udara od 3 J i visinu jezgre od 5 mm

Slike 5.16 te 5.17 prikazuju raspodjelu energije apsorbirane plastičnom deformacijom jezgre pri energiji udara od 3 J.

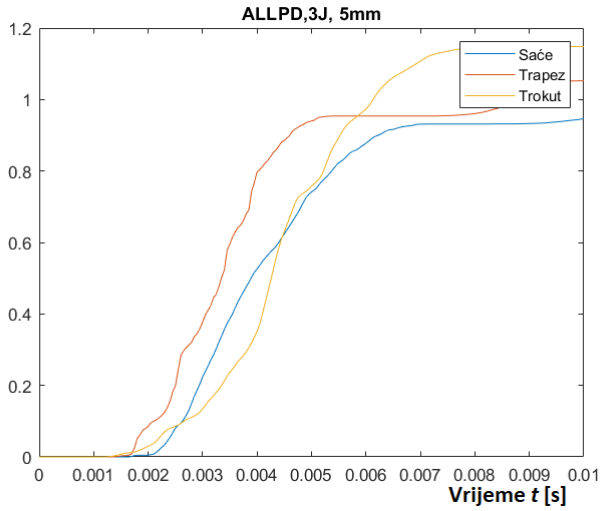
5.2.2. Energija udara 7 J

Iz dostupnih rezultata vidljivo je da pri srednjim energijama udara trapezna jezgra izvrsno apsorbira energiju, dok se trokutasta jezgra se ne pokazuje kao dobro rješenje

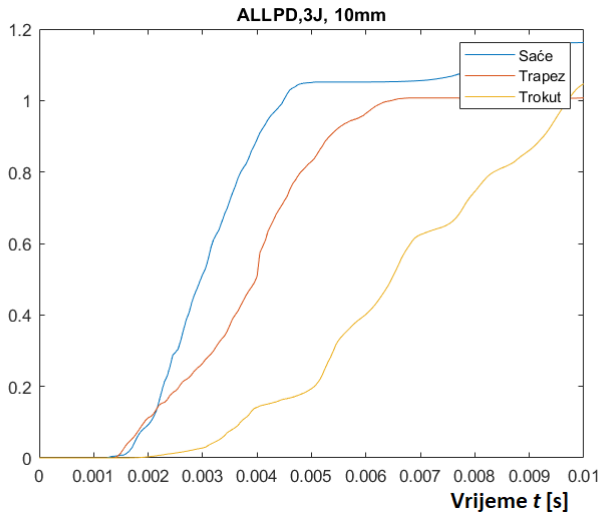
[h]



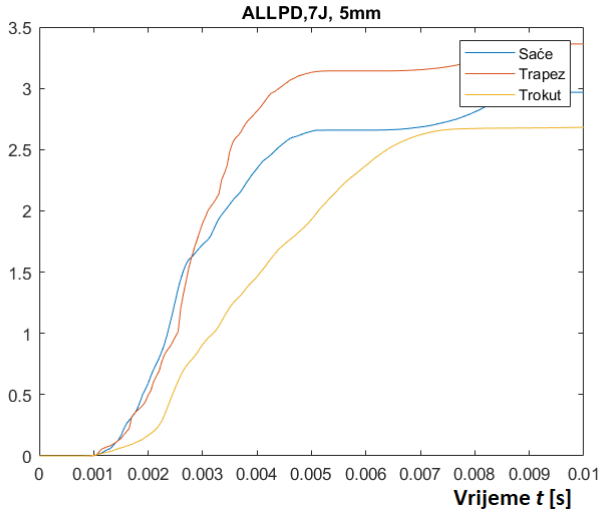
Slika 5.17: Raspodjela ekvivalentne plastične deformacije za energiju udara od 3 J i visinu jezgre od 10 mm



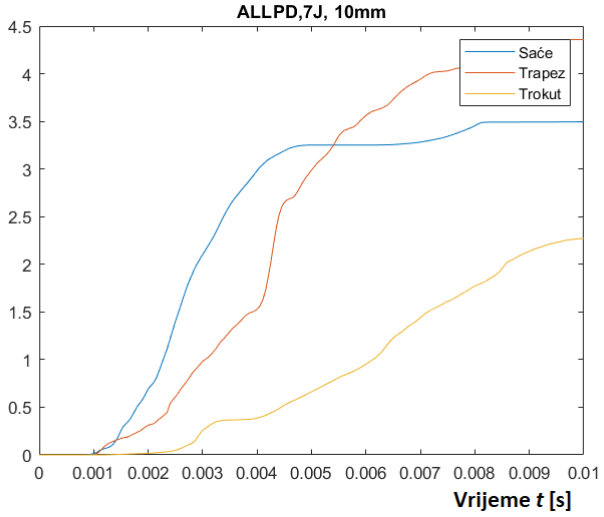
Slika 5.18: ALLPD pri energiji udara od 3 J i visini jezgre od 5 mm



Slika 5.19: ALLPD pri energiji udara od 3 J i visini jezgre od 10 mm

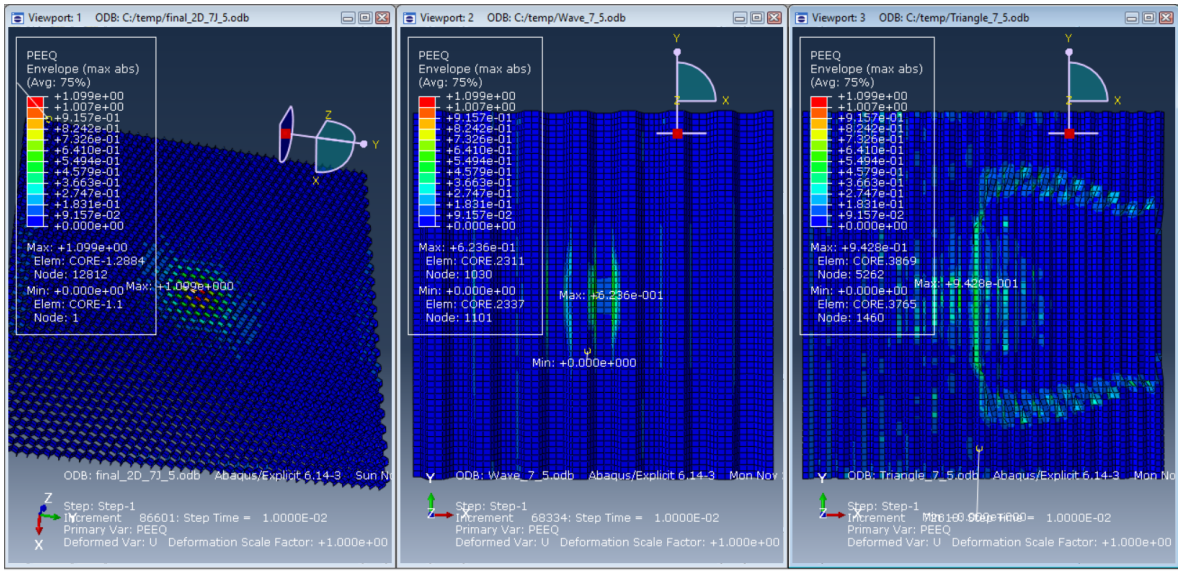


Slika 5.20: ALLPD pri energiji udara od 7 J i visini jezgre od 5 mm



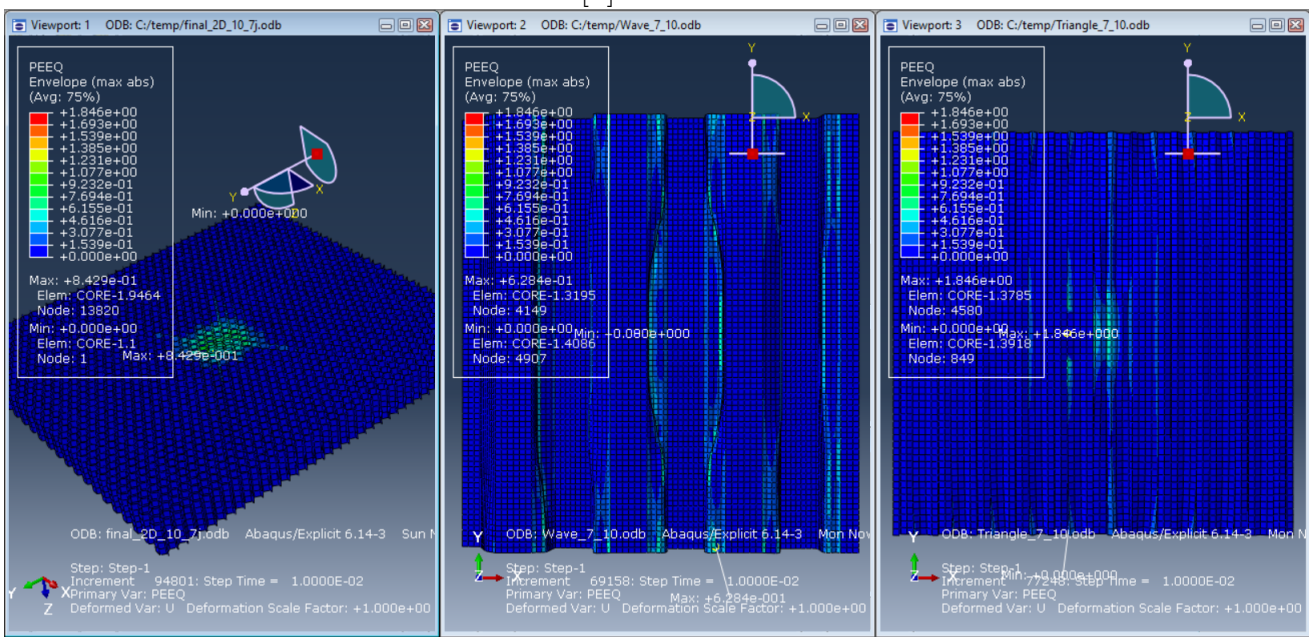
Slika 5.21: ALLPD pri energiji udara od 7 J i visini jezgre od 10 mm

pri većim visinama jezgre.

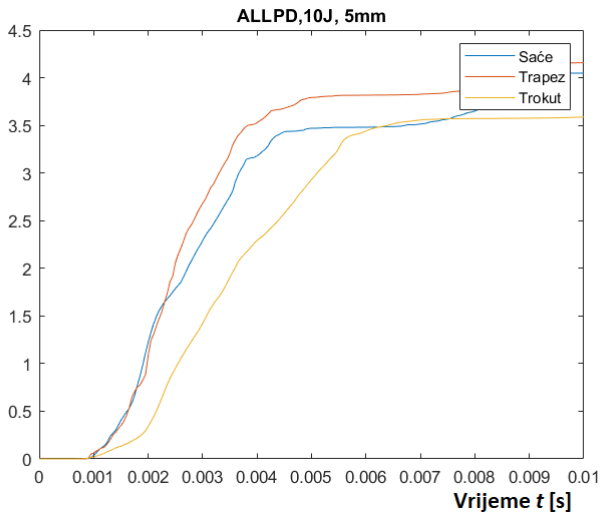


Slika 5.22: Raspodjela ekvivalentne plastične deformacije za energiju udara od 7 J i visinu jezgre od 5 mm

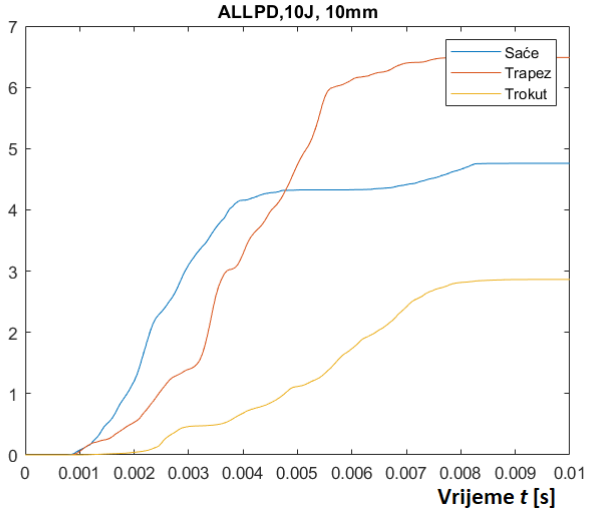
[h]



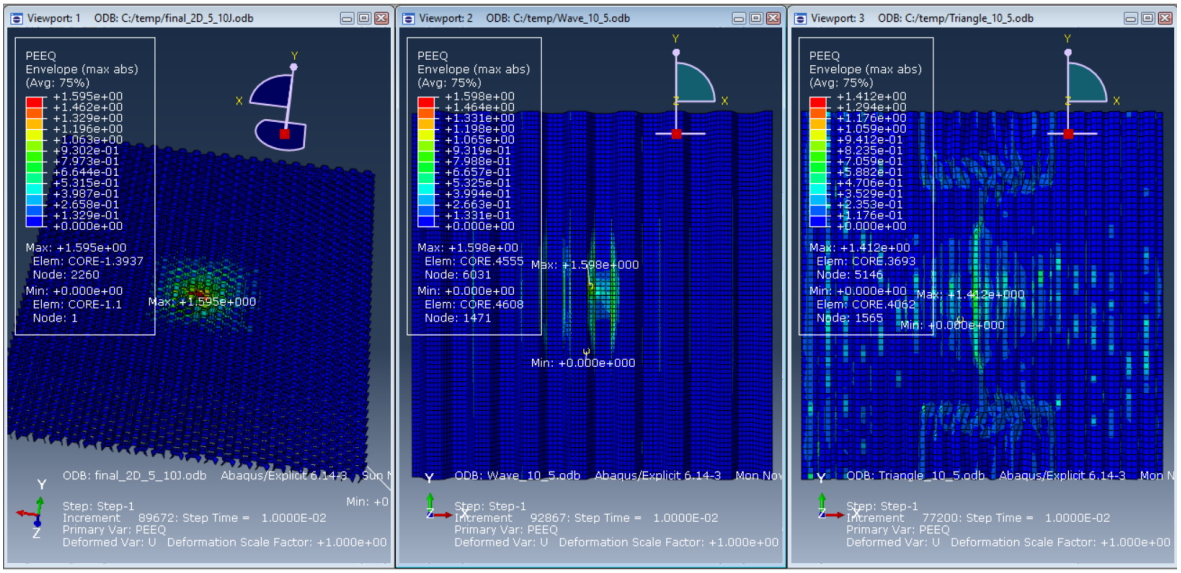
Slika 5.23: Raspodjela ekvivalentne plastične deformacije za energiju udara od 7 J i visinu jezgre od 10 mm



Slika 5.24: ALLPD pri energiji udara od 10 J i visini jezgre od 5 mm



Slika 5.25: ALLPD pri energiji udara od 10 J i visini jezgre od 10 mm

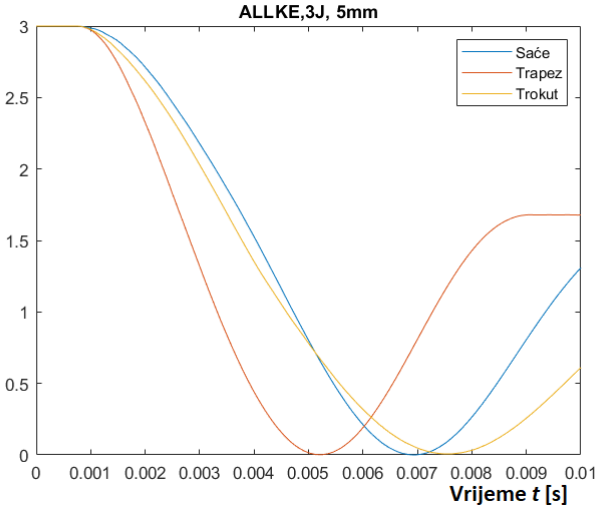


Slika 5.26: Raspodjela ekvivalentne plastične deformacije za energiju udara od 10 J i visinu jezgre od 5 mm

5.2.3. Energija udara 10 J

Promatrajući ove rezultate može se uočiti mnogo zanimljivosti;
Saćasta konfiguracija jezgre pri manjim energijama udara je efikasnija od preostale dvije, no, kako se povećava energija udara, tako i saćasta konfiguracija polako prestaje biti u mogućnosti primiti više energije negoli trapezna, no i dalje više nego trokutasta.

Zanimljivo je također primijetiti kako trapezna jezgra postiže najveću ukupni maksimum, pri najvećoj visini i energiji udara, sama jezgra apsorbira gotovo 40% cjelokupne energije udara.
Treća zanimljivost je ta da trokutna konfiguraciju ostvaruje jako dobre rezultate pri manjoj visini jezgre, no nažalost pri većoj visini ne uspijeva apsorbirati značajniji iznos. U gruboj usporedbi po slici 5.25, i saćasta i trapezna jezgra uspjele su apsorbirati dvostruko više energije od trokutne.

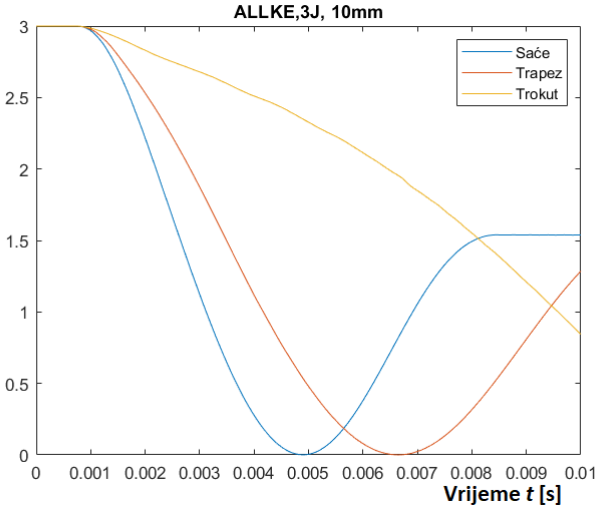


Slika 5.27: ALLKE pri energiji udara od 3 J i visini jezgre od 5 mm

5.3. ALLKE - Kinetička energija

Promjena kinetičke energija daje nam najbolji uvid u sveukupni iznos apsorbirane energije. Ona obuhvaća sve mehanizme disipacije energije pa se ovdje koristi kao apsolutno mjerilo sposobnosti kompozitnog sendvič panela da uspješno apsorbira energiju udara.

Iz slika 5.27 te 5.32 vidljivo je da se najviše energije apsorbira u slučaju trokutaste jezgre.



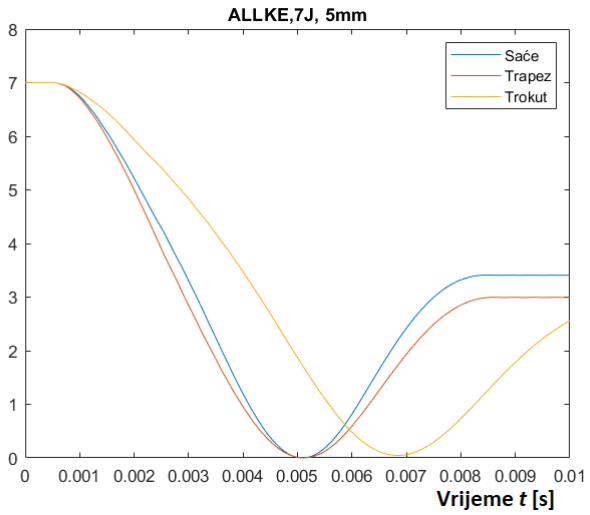
Slika 5.28: ALLKE pri energiji udara od 3 J i visini jezgre od 10 mm

5.3.1. Energija udara 7 J

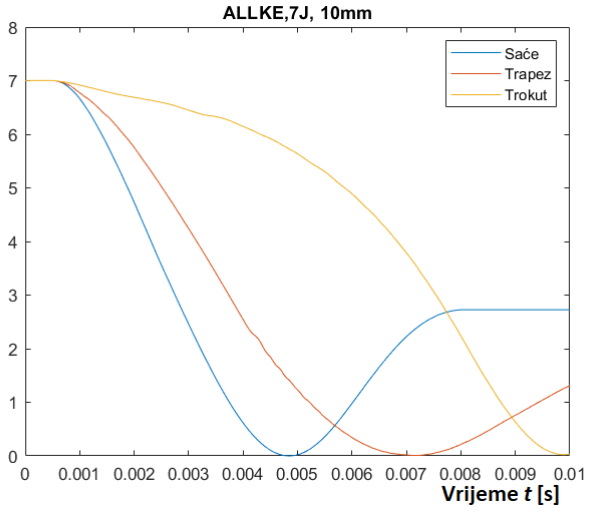
Pri srednjim vrijednostima energije udara i maloj visini jezgre nema značajnih odstupanja, sve izvedbe podjednako dobro obavljaju funkciju te apsorbiraju podjedak udio energije udara.

Glavna razlika je u samoj krivulji, odnosno ponašanju u vremenu.

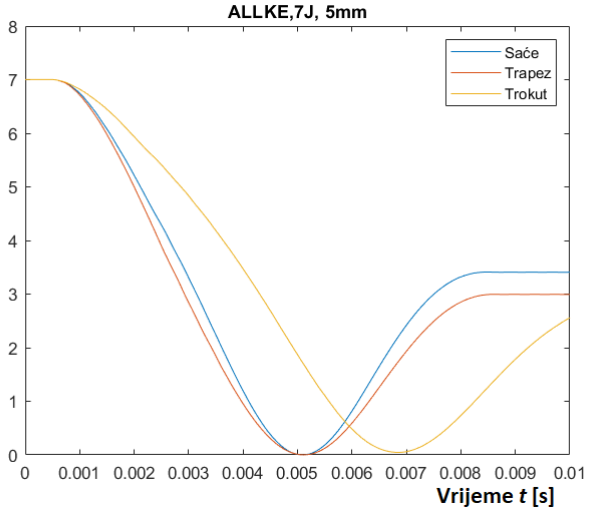
Pri većim visinama jezgre postoji određena razlika i ona znatno ide u prilog trokutastoj jezgri. Trokutasta jezgra apsorbira energiju udara gotovo u potpunosti.



Slika 5.29: ALLKE pri energiji udara od 7 J i visini jezgre od 5 mm



Slika 5.30: ALLKE pri energiji udara od 7 J i visini jezgre od 10 mm



Slika 5.31: ALLKE pri energiji udara od 10 J i visini jezgre od 5 mm

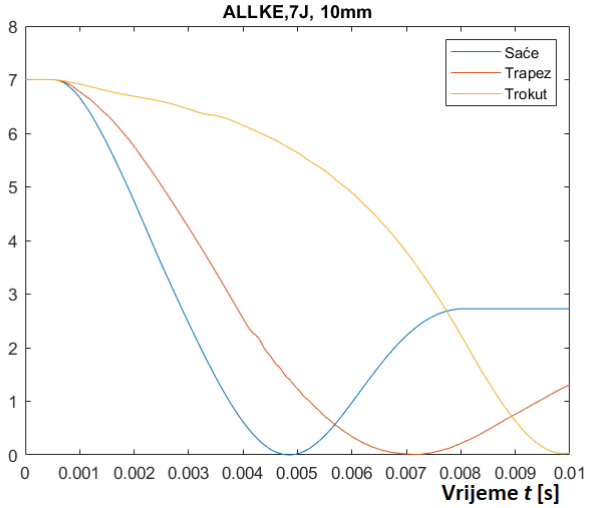
5.3.2. Energija udara 10 J

Promatrajući prikazane rezultate vidljivo je da se rezultati među samim jezgrama ne razlikuju značajno po konačnom rezultatu, no uočljivo je da trokutna konfiguracija ima znatno kašnjenje za preostale dvije izvedbe.

U konačnici uspijeva apsorbirati jednaku količinu energije kao i trapezna te saćasta, no treba joj više vremena da se to dogodi.

Također je zanimljivo promatrati točku infleksije, saćasta i trapezna jezgra imaju gotovo identičan trend u kojem se kinetička energija u kratkom roku pohrani u obliku potencijalne elastične energija, a zatim jednako brzo ponovno izbaci u obliku kinetičke energije.

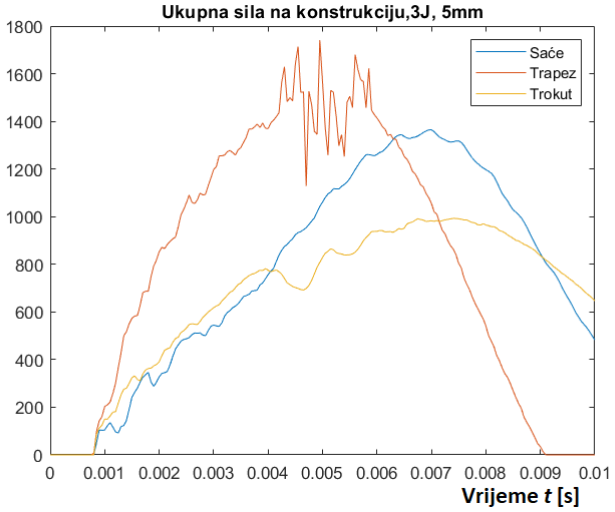
Trokutna jezgra tu energiju apsorbira, no ne u obliku potencijalne elastične energije, vec u vidu plastičnih deformacija.



Slika 5.32: ALLKE pri energiji udara od 10 J i visini jezgre od 10 mm

5.4. Sile koje se prenose na ostatak konstrukcije

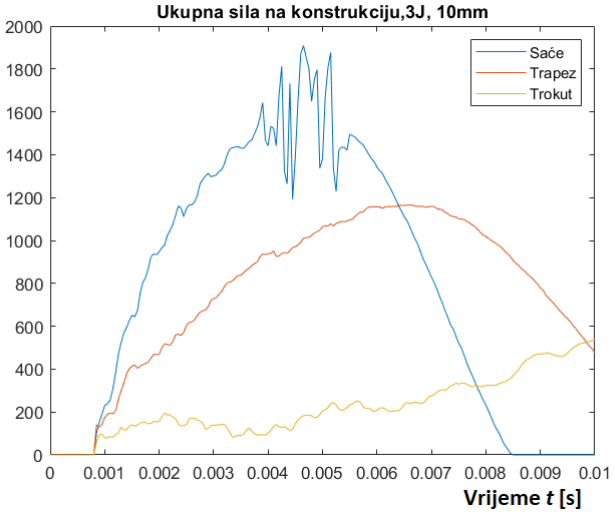
U ovom dijelu promatrat će se suma sila na fiksiranu površinu kompozitnog sendvič panela, to jest, suma sila koje se prenose na ostatak konstrukcije.



Slika 5.33: Sile koje se prenose na ostatak konstrukcije pri energiji udara od 3 J i visini jezgre od 5 mm

5.4.1. Energija udara 3 J

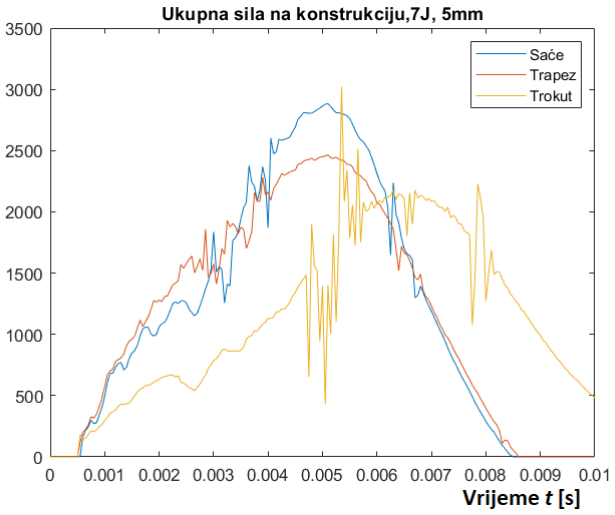
Iz slika 5.33 te 5.34 vidljivo je da se najveća sila na konstrukciju prenosi kod izvedbe s trapeznom jezgrom, a najmanje s trokutnom.
Ovaj rezultat je zanimljiv jer nam pruža uvid u širok izbor koji se nudi prilikom odabira sendvič konstrukcija. Trokutasta jezgra dosad je imala najlošije rezultate, no u ovom području ima mnogo bolje od saćaste i trapezne.
U slučaju veće visine jezgre, ta sposobnost postaje još izraženija.



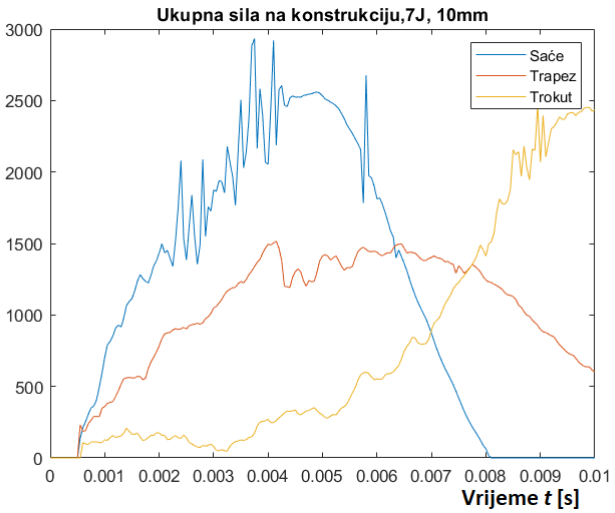
Slika 5.34: Sile koje se prenose na ostatak konstrukcije pri energiji udara od 3 J i visini jezgre od 10 mm

5.4.2. Energija udara 7 J

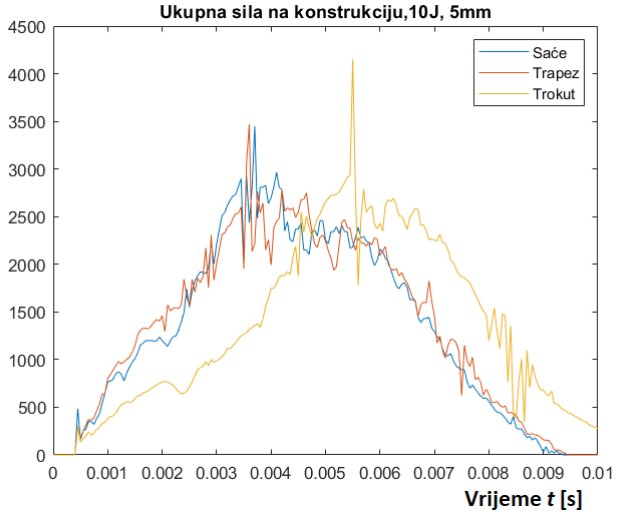
Na slikama 5.35 te 5.36, mogu se uočiti neki problemi s trokutastom jezgrom. Velike oscilacije u sili nisu dobar znak jer dodatno oštećuju materijal te ostatak konstrukcije. Za veću visinu jezgre te oscilacije postaju manje izražene, no sila kontinuirano raste, što predstavlja drugačiji izazov.



Slika 5.35: Sile koje se prenose na ostatak konstrukcije pri energiji udara od 7 J i visini jezgre od 5 mm



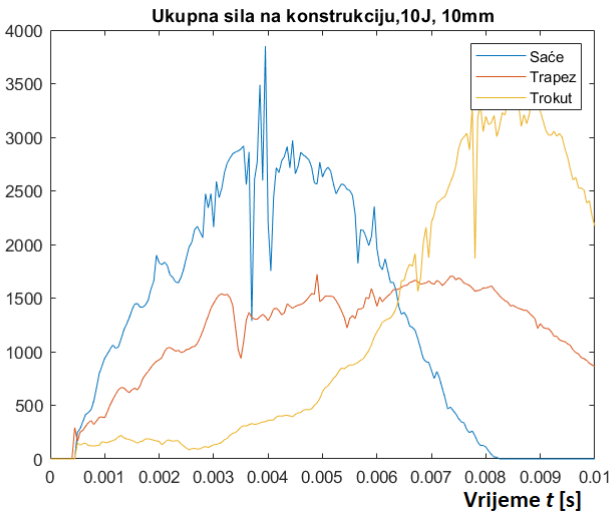
Slika 5.36: Sile koje se prenose na ostatak konstrukcije pri energiji udara od 7 J i visini jezgre od 10 mm



Slika 5.37: Sile koje se prenose na ostatak konstrukcije pri energiji udara od 10 J i visini jezgre od 5 mm

5.4.3. Energija udara 10 J

Promatrajući prikazane rezultate jasno je da trokutna konfiguracija zadovoljavajuće podnosi udare pri visini jezgre od 5 mm. Tada je sila koja se prenosi na ostatak konstrukcije većinom manja nego u preostale dvije izvedbe, no sami maksimum je viši. Povećanjem visine stvar se mijenja, te spomenuta konfiguracija počinje prenositi sve veće opterećenje na ostatak konstrukcije.
Saćasta i trapezna jezgra imaju relativno stabilne rezultate koji ne odskaču od očekivanja i ne mijenjaju se drastično u ovisnosti o visini jezgre odnosno energiji udara.



Slika 5.38: Sile koje se prenose na ostatak konstrukcije pri energiji udara od 10 J i visini jezgre od 10 mm

6 Zaključak

Nakon mnogo promatranja i proučavanja problematike udara te modeliranja kompozitnih konstrukcija, može se zaključiti da ovakav numerički model relativno realistično opisuje ponašanje kompozite pri ovakvom opterećenju. Rezultati na ovoj razini nisu dovoljni za ozbiljnu upotrebu u industriji, to bi zahtijevalo znatno više optimizacije te prilagodbu modela, mehanizama oštećivanja, kriterija popuštanja i drugog.
No, model je dovoljan za grubu usporedbu različitih izvedbi jezgri kao i za aproksimaciju, odnosno grubu procjenu ponašanja kompozitnog panela pri određenom opterećenju.
Što se samih modela tiče, može se izvesti jasan zaključak da su sva tri modela primjenjiva, no naravno u određenim uvjetima.
Saćasti model daje izvrsne i pouzdane rezultate u širokom spektru eventualnih scenarija eksploatacije.
Trapezni model se ponaša dosta slično, uz razliku da nešto bolje apsorbira i male energije udara.
Trokutna konfiguracija može biti izvrsno rješenje za one dijelove ili uređaje koju neće biti izloženi opasnosti od udara velikih energija ili za primjenu u industriji gdje se ne zahtjeva velika krutost *sandwich* panela, odnosno ne zahtjeva velika udaljenost između slojeva kompozita.
Na kraju se može reći da je saćasti model najsvestraniji, no najzahtijevniji za proizvodnju te analizu. Iz tog razloga bi se u određenim situacijama mogao zamijeniti trapeznim *sandwich* kompozitom.

Literatura

[1] Airplanegeeks. https://airlinegeeks.com/2015/08/11/a-pilot-explains-hail-and-how-it-can-effect-an-aircraft/.

[2] Achilles Petras. *Design of Sandwich Structures, PhD.* Robinson College, Cambridge, 1999.

[3] Madinter. https://www.madinter.com/en/nomex-560-410-2-mm-en.html.

[4] Pastrama Petrescu, Hadar. *Experimental program for impact tests on a honeycomb core composite material.* University of Bucharest, 2017.

[5] Lampeas Perogamvros. Experimental and numerical investigation of as4/8552 interlaminar shear strength under impact loading conditions, vol. 50(19) 2669-2685. *Journal of composite materials.*

[6] Ren Han Li Hou, Zhao. Crashworthiness optimization of corrugated sandwich panels. *Materials and Design*, 2013.

[7] Cantwell Rejab. The mechanical behaviour of corrugated-core sandwich panels. *Composites Part B: engineering*, 2013.

[8] Abaqus. 6.14 manual.

[9] Matej Markulin. Numeričko modeliranje udarnih oštećenja sandwich konstrukcija pri malim brzinama udara. Master's thesis, Sveučilište u Zagrebu, 2018.

[10] Garcia-Castillo Sanchez-Saez Ivanez, Moure. *The oblique impact response of composite sandwich plates.* University of Madrid, 2015.

[11] Roylance. *Laminated Composite Plates.* MIT, 2000.

[12] Springer Kollar. *Mechanics of Composite Structures.* Cambridge University, 2003.

[13] Ivica Smojver. Mehanika kompozitnih materijala. 2007.

[14] Askari Abdolrahim, Liaghat. *Experimental study of low velocity impact on sandwich panels with honeycomb core and comparison with the F.E.M. results.* Iran University of Science and Technology.

[15] Matweb. http://www.matweb.com/.

[16] Zhao Feng, Longquan. Experimental and numerical investigation of the effect of entrapped air on the mechanical response of the nomex honeycomb under flatwise compression. *Composite structures.*