Analiza vojne kacige prilikom udara projektila

Sviličić, Šimun

Master's thesis / Diplomski rad

2017

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:235:573381

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-19**

Repository / Repozitorij:

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

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Šimun Sviličić

Zagreb, 2017. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor: Student:

Doc. dr. sc. Ivica Skozrit, dipl.ing Šimun Sviličić

Zagreb, 2017. godina.

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

Zahvaljujem se svome mentoru, doc. dr.sc. Ivici Skozritu na kvalitetnim savjetima i podršci tijekom cjelokupnog procesa pisanja diplomskoga rada. Također se zahvaljujem svim profesorima, asistentima i osoblju koji su mi na bilo koji način pomogli tijekom studija.

Na kraju, zahvaljujem se djevojci, prijateljima i obitelji na podršci.

Šimun Sviličić

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, brodostrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

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

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Sviličić Šimun** Mat. br.: 0035186874

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza vojne kacige prilikom udara projektila**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Tactical Helmet Impact Analysis**

Opis zadatka:

Jedno od najbitnijih ispitivanja koja se provode na vojnim kacigama je udar projektila. Zahtjevi na kacige su da projektil određene mase i brzine ne probije kacigu tj. ne naruši njezinu cjelovitost. Razvoj vojnih kaciga može se promatrati kroz uporabu različitih materijala za njihovu izradu. Na početku su se kacige izrađivale iz materijala poput kože zatim iz raznih vrsta čelika i aluminijskih legura te u najnovije vrijeme od raznih kompozitnih materijala ojačanih vlaknima od kevlara.

Za proizvoljno odabranu geometriju i dimenzije vojne kacige potrebno je:
- za opisivanje materijalnog modela čelične kacige koristiti Johnson Cook model,
- primjenom metode konačnih elemenata tj. programskog paketa Abaqus® provesti eksplicitnu numeričku analizu vojne kacige prilikom udara projektila,
- u analizama razmatrati srednji režim brzina projektila koji je karakterističan za metke,
- koristiti više vrsta projektila (metaka) sa različitim brzinama i kutovima udara kako bi se usporedila dobivena rješenja i dobio bolji uvid u krajnje mogućnosti vojnih kaciga,
- model kacige diskretizirati sa više vrsta konačnih elemenata i promatrati njihovo ponašanje u eksplicitnoj numeričkoj analizi,
- usporediti rezultate dobivene metodom konačnih elemenata s dostupnim eksperimentalnim podacima.

Za diskretizaciju modela vojne kacige koristiti dostupne konačne elemente iz korištenog programskog paketa. Za sve primijenjene konačne elemente izvršiti verifikaciju na jednostavnijim problemima te rezultate usporediti s pripadnim analitičkim rješenjima. Osim toga, za proračunski model potrebno je odrediti optimalnu mrežu konačnih elemenata te prikazati konvergenciju rješenja.

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

Zadatak zadan:	Datum predaje rada:	Predviđeni datum obrane:
28. rujna 2017.	30. studenog 2017.	6., 7. i 8. prosinca 2017.

Zadatak zadao:

Skozrit Ivica

Doc. dr. sc. Ivica Skozrit

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ....1
POPIS SLIKA....3
POPIS TABLICA....5
POPIS OZNAKA....6
POPIS TEHNIČKE DOKUMETACIJE....7
SAŽETAK....8
SUMMARY....9
1. UVOD.... 10
1.1. Vojne kacige.... 13
1.2. Metci.... 13
2. ANALIZA UDARA 16
2.2. Zakon održanja mase.... 16
2.2. Zakon održanja količine gibanja 16
2.3. Zakon održanja energije 17
3. OSNOVE EKSPLICITNE ANALIZE 18
3.1. Određivanje vremenskog koraka.... 18
3.2. Skaliranje masene matrice i dijagonalne matrice 20
3.3. Metoda središnjih razlika 20
3.4. Početni uvjeti.... 21
4. MATERIJALNI MODEL PLASTIČNOSTI 22
4.1. Materijalni model 22
4.1.1. Johnson-Cook model.... 23
4.2. Brisanje konačnih elemenata.... 25
4.3. Kontakt 26
4.4. Konačni elementi za eksplicitnu metodu 27
4.4.1. Heksaedarski elementi.... 27
4.4.2. Tetraedarski konačni elementi 28
4.4.3. Ljuskasti konačni elementi.... 29

5. ABAQUS EXPLICIT VS. IMPLICIT 30

6. USPOREDBA ANALITIČKOG RJEŠENJA SA ABAQUS/EXPLICIT 32

6.1. Analitičko rješenje 32

6.1.2. Numeričko rješenje 33

7. VALIDACIJA KONAČNIH ELEMENATA 36

7.1. Usporedba vremena 37

7.2. Usporedba rješenja 39

8. ANALIZA UDARA PROJEKTILA U KACIGU 42

8.1. Validacija različitih vrsta mreže 43

8.2. Numerički model 47

8.2.1. Čelik E72 50

8.2.1.1. Winchester .308 ..... *50*

8.2.2.1. 45. ACP *54*

8.2.2. Čelik Weldox 460E 58

8.2.2.1. Winchester *.308* *58*

8.2.2.2. .45 ACP *63*

9. ZAKLJUČAK 65

10. LITERATURA 65

11. PRILOZI 65

POPIS SLIKA

Slika 1. Način popuštanja materijala pri udaru 12
Slika 2. Konstrukcija metka 14
Slika 3. Konstrukcija metka a) Winchester .308, b) .45 ACP 15
Slika 4. Metoda središnjih razlika [3] 21
Slika 5. Heksaedarski konačni element [3] 28
Slika 6. Tetraedarski konačni element [3] 28
Slika 7. Ljuskasti konačni element [3] 29
Slika 8. Jounce amortizer [3] 31
Slika 9. Udar mase u gredu [8] 32
Slika 10. Rubni uvjeti i opterećenja 34
Slika 11. Mreža konačnih elemenata 34
Slika 12. Prikaz: a) pomaka, b) naprezanja 35
Slika 13. a) Numerički model, b) rubni uvjeti i opterećenja 36
Slika 14. a) diskretizirana ploča sa C3D10M, b) diskretizirana ploča sa C3D8, c) diskretizirana ploča sa S4R, d) konačni elementi središta ploče 38
Slika 15. Usporedba vremena analiza 39
Slika 16. Usporedba rješenja heksaedarskih elemenata 40
Slika 17. Konvergencija tetraedarskih elemenata 41
Slika 18. Promjena energija tijekom vremena 41
Slika 19. Izgled osnovnog modela kacige [6] 42
Slika 20. Izgled pojednostavljenog modela kacige [6] 43
Slika 21. Numerički model kacige i zrna s rubnim i početnim uvjetima 44
Slika 22. Kaciga diskretizirana pomoću : a) tetraedarskih i heksaedarskih, b) tetraedarskih, c) ljuskastih konačnih elemenata 44
Slika 23. Izlazne kinetičke energije zrna 45
Slika 24. Pomak kacige uslijed udara zrna 46
Slika 25. Vrijeme a) t = 0.00008 s, b) t = 0.00016 s, c) t = 0.00024 s 47
Slika 26. Mreža konačnih elemenata za a)Winchester. 308 konusno, b) Winchester .308 polusferno i c) .45 ACP zrno 48
Slika 27. Prikaz položaja gibanja zrna prema kacigi 49

Slika 28. Prikaz opterećenja i rubnih uvjeta 50
Slika 29. Dijagram izlaznih brzina 51
Slika 30. Položaj 1. (t = 0,0015 s) 51
Slika 31. Deformacija .308 zrna a) t = 0 s, b) t = 0,0015 s 52
Slika 32. Prikaz udara u položaju 1. 52
Slika 33. Naprezanje u a) položaj 2. , b) položaj 3. (t = 0,0015 s) 53
Slika 34. Plastična zona za položaj 4. 53
Slika 35. Izgled zrna: a) prije udara, b) nakon udara 54
Slika 36. Plastična deformacija za položaj 1 (t = 0.0025 s) 54
Slika 37. Udar .45 ACP zrna tijekom vremena 55
Slika 38. Udar zrna a) položaj 2., b) položaj 3. za t = 0,0025 s 55
Slika 39. Udar zrna za položaj 4. (t = 0.0025 s) 56
Slika 40. Dijagram usporedbe pomaka zrna za položaj 4. 56
Slika 41. Dodatno usitnjena mreža konačnih elemenata 57
Slika 42. Usporedba pomaka 57
Slika 43. Polsuferno zrno a) t = 0 s, b) t = 0,0015 s 58
Slika 44. Probijanje polusfernog zrna: a) t = 0,0005 s, b) t = 0,0006 s 59
Slika 45. Plastična zona – položaj 1. (t = 0,0015 s) 59
Slika 46. Plastična zona za položaj 1., stražnji dio kacige (t = 0,003 s) 60
Slika 47. Plastična zona za položaj 1., konusni završetak 60
Slika 48. Rupa nastala prilikom sudara kacige i: a) polusfernog, b) konusnog zrna 61
Slika 49. Položaj a) 2., b) položaj 3. 61
Slika 50. Izlazna rupa za položaj 4. (t = 0,0015 s). 62
Slika 51. Dijagram izlaznih brzina 62
Slika 52. Pomak kacige za položaj 1. 63
Slika 53. Naprezanje kacige za položaj 2. 63
Slika 54. Plastična zona za položaj 3. 64
Slika 55. Naprezanje za položaj 4. 64

POPIS TABLICA

Tablica 1. Podaci za Weldox 32
Tablica 2. Dodatni podaci za materijal 33
Tablica 3. Vrste konačnih elemenata 44
Tablica 4. Vrste konačnih elemenata 48

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	N/mm^2	Konvencionalna granica tečenja za Johnson-Cook
A_0	mm^2	Početna površina presjeka tijela
A_p	mm^2	Površina pukotina na presjeku tijela
B	MPa	Parametar očvršćivanja materijala
C	Ns/m	Matrica prigušenja
c	m/s	Brzina propagacije vala
c_d	m/s	Brzina širenja dilatacijskog vala
c_p	J/K	Specifični toplinski kapacitet
C_1	-	Konstanta brzine deformacije za Johnson-Cook model
C_2	-	Konstanta brzine deformacije za Johnson-Cook model
D	-	Parametar oštećenja materijala
D_C	-	Parametar loma
$D_{1\text{-}5}$	-	Parametri Johnson-Cook za određivanje ekvivalente plastične deformacije pri lomu
D_{max}	-	Maksimalna vrijednost parametra oštećenja
$d\boldsymbol{\varepsilon}$	m/m	Inkrementalna promjena vektora deformacija
E	MPa	Youngov modul
E_i	J	Unutarnja skladištena energija u početnom trenutku
E_f	J	Unutarnja skladištena energija u krajnjem trenutku
E_k	J	Kinetička energija
F_i	N	Vektor unutarnjih sila
F_e	N	Površina pukotina i šupljina na presjeku tijela
g	m/s^2	Površina pukotina i šupljina na presjeku tijela
$\boldsymbol{I}$	Ns	Impulsna sila
$\mathbf{K}$	N/m	Matrica prigušenja
$\mathbf{M}$	kg	Matrica masa
m	-	Parametar koji opisuje popuštanje uslijed temperagrijanja
m_i	kg	Masa pridružena i-tom stupnju
U	J	Unutarnja energija

Δt	s	Vremenski korak
T	K	Temperatura
T_{melt}	K	Temperatura tališta materijala
T_0	K	Sobna temperatura
v	m/s	Brzina
$\boldsymbol{v_i}$	m/s	Početna vrijednost brzine
$\boldsymbol{v_f}$	m/s	Konačna vrijednost brzine
$\mathbf{u}''$	m/s^2	Matrica akceleracija
$\mathbf{u_i}$	m/s^2	Vektor pomaka u *i*-tom trenutku
$\mathbf{u_{i-1}}$	m/s^2	Vektor pomaka u trenutku *i-1*
$\mathbf{u_{i+1}}$	m/s^2	Vektor pomaka u trenutku *i+1*
υ	-	Poissonov faktor
χ	-	Taylor-Quinney-eva emiprijska konstanta
ε_{ekv}^{f}	-	Ekvivalentna plastična deformacija pri lomu
ε_{pl}	-	Plastična deformacija
ε_{pl}^{f}	-	Plastična deformacija pri inicijaciji oštećenja
$\dot{\varepsilon}_{pl}$	1/s	Brzina plastične deformacije
$\dot{\varepsilon}_0$	1/s	Referentna brzina plastične deformacije
ρ	kg/m^3	Gustoća materijala

SAŽETAK

U radu se daje kratak pregled o projektilima, vojnoj kacigi, samoj prirodi udara te balistici, s naglaskom na terminalnu balistiku. U drugome poglavlju razrađuje se eksplicitna analiza, temelji eksplicitne analize, način kako je implementirana u programski paket, različite tehnike koje program nudi u svrhu smanjenja računalnog vremena i stabilnosti rješenja. Treće poglavlje opisuje dostupne materijalne modele u programskome paketu, naznačuje odabrani materijalni model te problematiku materijalnog modela, njegove prednosti, način kako je implementiran u Abaqus/Explicit te poteškoće implementacije. Također, razmatraju se različiti pristupi rješavanja problema, koristeći različite konačne elemente, i navode se prednosti i nedostaci istih. Peto poglavlje daje uvid u razliku između implicitnog i eksplicitnog načina rješavanja problema, kao i njihove prednosti i nedostatke. Točnost rješenja eksplicitnim pristupom prikazana je u šestome poglavlju usporedbom analitičkog rješenja udara mase u gredu s numeričkim rješenjem dobivenim pomoću Abaqus/Explicit. Validacija konačnih elemenata provedena je u sedmome poglavlju gdje se vrši niz simulacija s različitim vrstama konačnih elemenata kako bi se uvidio optimalniji pristup problemu kroz vrijeme, točnost rezultata i samu stabilnost analize. U osmome poglavlju razmatra se sam problem s kompleksnom geometrijom kacige, uzima se u obzir više tipova zrna kako bi se uvidjele razlike između njih. Vrše se simulacije s različitim tipovima zrna, različitim brzinama udara zrna u kacigu i različitim materijalom iz četiri položaja.

Ključne riječi: eksplicitna numerička analiza, metoda konačnih elemenata, analiza udara, kaciga, zrno, metak, Johnson-Cook model

SUMMARY

This thesis consists of nine chapters. First, there is a short introduction into the field of terminal ballistics, projectiles, criteria for classifying ballistic impact and impact analysis. In second chapter, explicit analysis is described, as well as theory of it, the way it is implemented in software, different software tehniques for time scaling and analysis stability. Third chapter gives overview of existing material models available in literature and more detailed overview of material model that has been used in this work. It is described why this material model is used in the work, what are advantages and disadvantages of the model and how it is implemented in Abaqus/Explicit. Also, different finite elements are shown and described. After that, in fifth chapter, difference between implicit and explicit analysis is explained. Validation of Abaqus/Explicit is shown in sixth chapter by comparing analytical results of mass on beam impact with numerical results. Validation of explicit finite elements is presented in chapter seven. Different finite elements where used in analysis to determine running time and result convergence of analysis for those elements. In chapter eight there is intro into the main problem of analysis, simplification of complex geometry, different projectiles with diffrenet velocities and under four different angles.

Key words: explicit numerical analysis, finite elements method, ballistic impacts, helmet, projectile, bullet, material model, projectile, Johnson-Cook model

1. UVOD

Ako je moguće sažeto opisati povijest čovječanstva onda bi to bilo pomoću dvije najčešće riječi – znanost i rat. Dva navedena pojma ujedno su i najveći pokretači napretka društva te se neprekidno isprepliću. Najvažniji dio ratovanja danas je vojna tehnika te će se ovdje razmatrati jedan dio vojne tehnike – zaštita vojnika. Ako se radi o pješaštvu onda je najčešći element zaštite njihovih života vojna kaciga. Procjenjuje se da područje glave dobiva oko 25% pogodaka na bojištu, a preko 50% smrtnih slučajeva posljedica su pogotka u glavu. Upravo zato glava je primarna točka zaštite. Razvoj vojne kacige najviše je napredovao razvojem materijala, ali nije dosegnuo vrhunac, niti će ga vjerojatno dosegnuti, jer su se usporedno s razvojem kacige razvijali i svi dijelovi metka – od punjenja do same konstrukcije zrna. Prilikom konstruiranja vojne opreme, pa tako i kacige, poželjno je predvidjeti ponašanje konstrukcije prilikom opterećenja te je sukladno tome poboljšati, ako je to moguće. Zato će se razmatrati udar projektila, točnije zrna, u vojnu kacigu. Kako bi se predvidio događaj sudara zrna u kacigu potrebno je poznavati područje balistike. Balistika se može podijeliti na tri područja: unutranju balistiku, koja se bavi interakcijom projektila i cijevi prije izlaska projektila iz cijevi, vanjsku balistiku, koja se bavi određivanjem putanje i pojavama prilikom leta projektila, te terminalnu balistiku, koja se bavi interakcijom zrna i mete. U ovome radu analizira se terminalna balistika te će se ona stoga detaljnije opisati. Terminalna balistika može se podijeliti prema više kriterija, a najčešća je podjela prema udarnoj brzini zrna u metu:

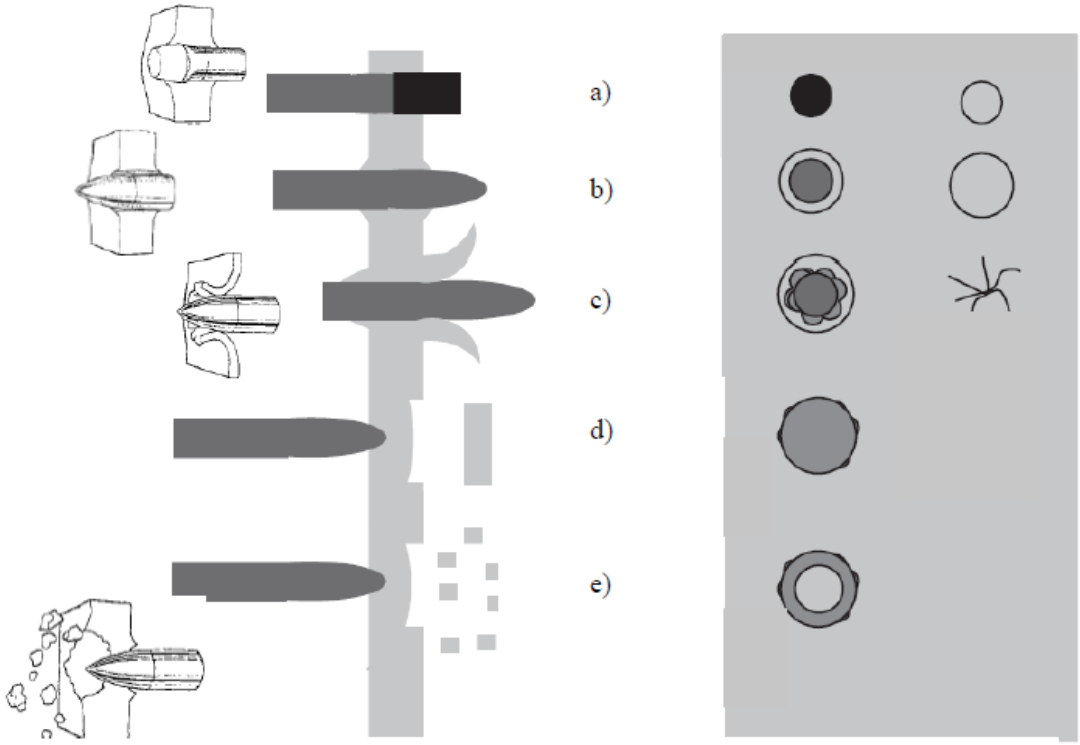
- **niske brzine udara** (0-50 m/s) - (eng. *Low velocity regime*) pri ovim brzinama javljaju se elastične i plastične deformacije mete. Pomaci uslijed savijanja mete su veliki i utjecaj zrna na metu nije lokalan, već se širi na okolne konstrukcijske elemente koji utječu na eventualno probijanje. Ova kategorija obuhvaća udare uslijed ispadanja objekata ili sudara vozila (kopnenih vozila ili brodova),
- **niže-srednje brzine udara** (50-500 m/s) - (eng. *Sub-ordance velocity regime*) pri ovim brzinama deformacije zrna (uglavnom tvrđi od mete) su elastične, a meta se plastično deformira. Utjecaj udara zrna je lokaliziraniji s porastom brzine – plastična deformacija mete se događa u zoni oko samog udara projektila;
- **srednje brzine udara** (500-1300 m/s) - (eng. *Ordnace velocity regime*) pri ovim brzinama kinetička energija se pretvara u rad plastične deformacije i zrna i mete. S rastom brzine raste i utjecaj gustoće materijala na probijanje.

Lokalna zona plastične deformacije sve više je ograničena na područje veličine 2 do 3 promjera zrna i globalne deformacije mete sve su manje vidljive. U ovo područje brzina ulazi i većina vojnih projektila – od zrna do većih projektila sa visokom kinetičkom energijom;

- **više-srednje brzine udara** (1300-3000 m/s) - (eng. *Ultra-ordance velocity regime*) pri ovim brzinama ponašanje materijala mete može se opisati kao ponašanje fluida. Naime, pojas brzina uglavnom se nalazi iznad hidrodinamičke prijelazne brzine za duktilne metale [3] (brzina ispod koje se projektil i meta mogu opisivati kao elastična tijela, a iznad koje se mogu opisivati kao fluidi [3]). Događa se i erozija projektila jer naprezanja dosežu i do nekoliko puta veće vrijednosti od vrijednosti čvrstoće materijala projektila. Gustoća materijala dominantan je čimbenik koji određuje probijanje;
- **visoke brzine udara** (>3000 m/s) - (eng. *Hypervelocity regime*) pri ovim brzinama ponašanje materijala i projektila i mete može se opisivati kao ponašanje fluida, a čvrstoća materijala postaje zanemariva. Erozija projektila je redovita pojava, a pri višim brzinama događa se i da projektil potpuno erodira ili čak materijal sublimira. Pri brzinama iznad 12000 m/s događaju se i eksplozije prilikom udara uslijed oslobađanja velike količine kinetičke energije. U ovo područje brzina uglavnom spadaju udari svemirskih tijela u svemirske letjelice ili udari projektila koji probija mehanizmom kumulativnog mlaza.

U ovome radu promatrati će se druga i treća kategorija udara, tj. **niže-srednje brzine udara** i **srednje brzine udara,** jer razmatrane brzine udara iznose 340 m/s odnosno 940 m/s. Osim brzine kojom projektil udara u metu može se razmatrati i kriterij debljine mete. U terminalnoj balistici poznato je više načina popuštanja pri perforaciji projektila u metu (slika 1). Oni se javljaju ovisno o svojstvima materijala mete i obliku vrha projektila. Jedan od načina popuštanja je način pri kojem se izbija čep iz mete (engl. *plugging*; slika 1.a). Čep (engl. *plug*) nastaje prilikom udara projektila ravnog vrha ili u slučajevima udara polusfernog projektila pri brzinama oko granične brzine probijanja (najmanja brzina pri kojoj projektil perforira metu, što znači da kompletno prolazi kroz nju). Čep nastaje uslijed djelovanja mehanizma adijabatskog smicanja pri kojem se formira usko područje smičnih naprezanja (slika 1. [6]). Na tom području se sav rad plastične deformacije pretvara u toplinu, koja uzrokuje lokalni rast temperature, jer zbog brzine deformacije cijelog procesa

ne stigne proći kroz materijal prema ostatku mete. Taj lokalni rast topline uzrokuje dodatno plastično tečenje u zoni smičnih naprezanja sve do rasterećenja ili loma materijala [5]. Pri perforiranju zrna sa „šiljastim“ vrhom (tj. u najvećem broju slučajeva projektili sa koničnim vrhom ili vrhom oblika dijela kružnice u presjeku – engl. *ogival*) u duktilne ploče dolazi do načina popuštanja prikazanog na slici 1.b) pri čemu zrno penetrira metu u točki udara i širi rupu gurajući radijalno materijal (engl. *piercing*) [5]. Način popuštanja prikazan na slici 1.c) (engl. *petaling*) karakterističan je za udare „šiljastih“ projektila u tanke ploče.



Slika 1. Način popuštanja materijala pri udaru

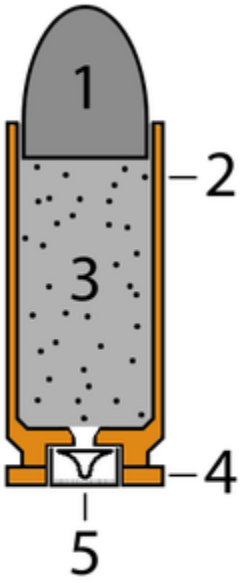
Na slikama 1.d) i 1.e) prikazana su dva slična načina popuštanja karakteristična za materijale koji imaju tlačnu čvrstoću veću od vlačne. Način 1.d) prikazuje inicijaciju koja se događa zbog velike deformacije ploče, dok se kod načina 1.e) događa fragmentacija materijala uzrokovana refleksijom vala naprezanja na stražnjoj plohi ploče.

1.1. Vojne kacige

U prošlosti su vojnici nosili kožne obloge kako bi se zaštitili od posjekotina. Ulaskom u brončano doba kacige su se radile od bronce, a nedugo zatim, nakon otkrića željeza, kacige su rađene od željeza. Čelični dizajn počeo je znatno kasnije, oko 950. godine, ali se postepeno odustajalo od čeličnih vojnih kaciga zbog njihove težine i nepraktičnosti. Kako je oružje napredovalo, posebno izumom vatrenog oružja i topništva krajem 17. stoljeća, pokazalo se da je neophodno posvetiti više pažnje razvoju zaštitne opreme te se ponovno uvela čelična kaciga koja se nastavila upotrebljavati tijekom Prvog svjetskoga rata. Problem čeličnih kaciga primarno je bila njihova težina, stoga se pronašla alternativa, legura čelika i mangana. Ovakve kacige bile su nešto manje težine te su se održale u uporabi do 1980-ih godina. Prava revolucija u konstruiranju kaciga dogodila se 1960-ih godina kada se u američkoj kompaniji DuPont izumio novi materijal – aramidna vlakna te se materijal kasnije počeo promovirati pod nazivom *Kevlar* [14]. U posljednje se vrijeme razvijaju napredne vojne kacige koje također koriste *Kevlar*, a zbog promijenjenog dizajna i tehnologije proizvodnje nešto su lakše te na sebi sadrže više elektronske opreme.

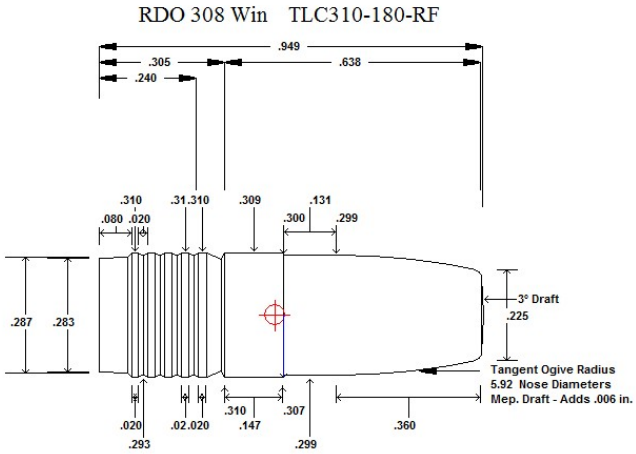
1.2. Metci

Metak je element koji u interakciji s vatrenim oružjem izbacuje projektil, tj. zrno. Prva uporaba metka je zabilježena 1247. godine te je zrno bilo izrađeno od kamena. Tek 200 godina kasnije uvodi se metal kao standardni materijal jer kamen jednostavno nije bio dovoljno tvrd da penetrira kroz obrambene zidove. Zrno je u početku imao izgled kugle, da bi se u 19. stoljeću zamijenilo zrnom cilindričnog oblika tijela s koničnim ili sferičnim završetkom. Sama konstrukcija metka sastoji se od nekoliko dijelova, kao što se može vidjeti na slici 2. Dizajn metka mora riješiti dva osnovna problema: mora ostvariti dobro brtvljenje sa cijevi vatrenog oružja, kako bi ostvarilo što veći prijenos energije iz komore na metak, inače će plin optjecati metak i smanjiti njegovu efikasnost i točnost, te ujedno ne smije oštetiti cijev vatrenog oružja prilikom ispaljivanja. Materijal svih dijelova metka, posebice zrna, također se mijenjao kroz povijest. Počevši od lijevanog željeza koje se koristilo kod zrna koje se ispaljivalo pomoću baruta te imalo brzinu manju od 300 m/s pa sve do modernih metaka koji su ispaljivali zrna pri većim brzinama i samim time imali opasnost od otapanja kučišta zbog viskoznosti te su koristili bakreni završetak koji ima veću temperaturu taljenja. Na slici 2. prikazana je konstrukcija metka.

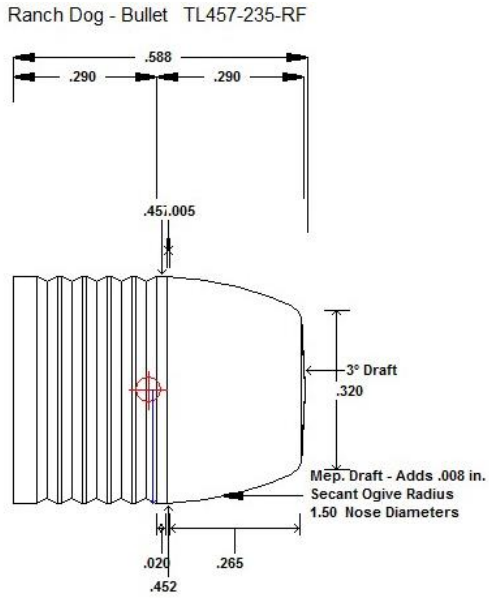


Slika 2. Konstrukcija metka

Kao što se vidi na slici 2. metak se sastoji od: 1. glave, 2. čahure, 3. punjenja koje uzrokuje pokretnu silu, 4. obruča i 5. obarača. Veličine metaka su izražene preko promjera i težine te se metci dijele prema veličinama ili prema namjeni. Brzine zrna znatno variraju i ovise o mnogima faktorima, kao što su: atmosferski tlak, brzina vjetra, veličina zrna i sam oblik zrna, ali može se ustvrditi da većina zrna putuje brzinom većom od brzine zvuka. U ovome radu razmatrati će se udar Winchester .308 zrna zbog njegovih ekstremnih karakteristika jer brzina samoga zrna dostiže čak i do 940 m/s. Za manje brzine razmatrati će se metak namijenjen ručnim pištoljima čija se čahura naziva .45 ACP s vrstom zrna JHP koji postiže brzine do 340 m/s. Važno je napomenuti da za obje vrste zrna postoje dvije varijante završetka: polusferni i konusni završetak. Prilikom modeliranja i kasnije analize korištena su zrna s konusnim završetkom za .45 ACP, dok se za .308 model analiziralo zrno i s polusfernim i s konusnim završetkom. Razlika između dva zrna je ta što je polusferni oblik manje smrtonosan. On prilikom udara ne mijenja znatno oblik, već probija kacigu i tkivo s početnim promjerom, dok se konusni oblik znatnije deformira i samim time propagira kroz tkivo s većom površinom. Crteži zrna odgovarajućih metaka prikazani su na slikama 3.a) i 3.b). Zrna su modelirana pomoću 3D programskog paketa Solidworks te su se naknadno pojednostavila za analizu uz napomenu da su na slikama 3.a) i 3.b) dimenzije preuzete od proizvođača [12] i [13] te su dimenzije prikazane u inčima.



a)



b)

Slika 3. Konstrukcija metka a) Winchester .308, b) .45 ACP

Težina Winchester .308 zrna iznosi 9 grama [11] dok težina zrna .45ACP zrna iznosi 15 grama [12].

2. ANALIZA UDARA

Kada se fizikalno razmatra pojava udarnog opterećenja može se ustvrditi da se temelji na tri osnovna zakona mehanike kontinuuma: zakon održanja mase, zakon održanja energije te zakon održanja količine gibanja.

2.2. Zakon održanja mase

Zakon održanja mase osnovni je zakon u kontinuumskoj mehanici te kaže da masa ne može nastati niti nestati u zatvorenom ili otvorenom volumenu:

$$\int_V \rho \mathrm{d}V = \text{konst}, \tag{2.1}$$

gdje je ρ gustoća materijala, a V volumen.

2.2. Zakon održanja količine gibanja

Zakon količine gibanja izvodi se iz drugog Newtonovog zakona:

$$F = m\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}, \tag{2.2}$$

gdje je F sila, m masa, v brzina, a t vrijeme.

Ako se uvede zatvoreni sustav od n masa m_i na koji ne djeluju vanjske sile slijedi:

$$\sum_{i=1}^{n} m_i v_i = \text{konst.} \tag{2.3}$$

Ako se jednadžba (2.2) pomnoži sa dt i integrira dobiva se zakon impulsa:

$$I = \int \mathrm{F}\mathrm{d}t = \int \mathrm{m}\mathrm{d}v = \mathrm{m}v_f - mv_i, \tag{2.4}$$

gdje je I impulsna sila, v_i početna brzina a v_f konačna brzina.

Ovaj zakon implicira da impuls I koji djeluje na tijelo mijenja količinu gibanja od početne količine mv_i do konačne vrijednosti mv_f ili, jednostavnije rečeno, prikazuje energiju u jedinici vremena koja se mora primijeniti kako bi se tijelo zaustavilo.

2.3. Zakon održanja energije

Zakon održanja energije poznatiji kao I. zakon termodinamike dokazuje da energija ne može nestati ili nastati ni iz čega, već samo može mijenjati oblik. Ako se promatra sustav kao skup diskretnih masa m_j, zakon održanja energije pokazuje da je ukupna energija jednaka u početnome stanju ($t = 0$) i u konačnome stanju.

$$\sum_i E_i + \sum_i \frac{1}{2}\rho v_i^2 = \sum_j E_f + \sum_j \frac{1}{2}\rho v_f^2 + W, \tag{2.5}$$

gdje je E_i uskladištena unutarnja (elastičnu) energija u početnome trenutku, E_f uskladištena untarnja energija u konačnome trenutku, a W predstavlja obavljeni rad tijekom procesa udara.

Navedene jednadžbe (2.1) do (2.5) predstavljaju osnovu promatranja fenomena udara koji se koristi u softverskom paketu Abaqus/Explicit koji se temelji na metodi konačnih elemenata [3]. Također valja zapisati i ravnotežu kinetičke energije nakon udara jer ona ukazuje na iznos apsorbirane energije uslijed udara u metu:

$$\frac{1}{2}mv_i^2 = \frac{1}{2}mv_f^2 + E, \tag{2.6}$$

gdje je v_i brzina prije udara, v_f brzina nakon udara, a E je energija deformiranja apsorbirana tijekom udara.

Navedena energija E može se razložiti na dvije komponente: elastičnu energiju koja uzrokuje elastične deformacije i vibracije te neelastičnu energiju koja se troši na plastične deformacije i lom, dok oni zajedno predstavljaju disipaciju energije. Sa stajališta ovoga rada može se zaključiti da će s većom energijom projektila biti veće plastične deformacije i veća vjerojatnost oštećenja te je konstrukcijski zahtjev same kacige takav da prilikom udara dođe do što manjih deformacija. Prevelike deformacije opasne su pa se teži idealno elastičnome sudaru između zrna i kacige kako bi kaciga preuzela što manje deformacije i zaustavila inicijaciju pukotine i potencijalni lom te odbila zrno od sebe ne uzrokujući nikakve posljedice.

3. OSNOVE EKSPLICITNE ANALIZE

Eksplicitna analiza je analiza koja se izvodi iz dinamičke jednadžbe (3.1) [3] gdje su inercijske sile označene na lijevoj strani, dok je na desnoj strani prikazana razlika između vanjskih i unutarnjih sila, odnosno akcijskih i reakcijskih.

$$\boldsymbol{M}u'' = \boldsymbol{F_e} - \boldsymbol{F_i}\,, \tag{3.1}$$

gdje je: $\boldsymbol{M}$ masena matrica, u'' vektor ubrzanja, $\boldsymbol{F_e}$ vektor vanjskog opterećenja, a $\boldsymbol{F_i}$ vektor unutarnjeg opterećenja.

Jednadžba (3.1) primjenjuje se na većinu problema te u sebi sadrži sve nelinearnosti: velike deformacije, odnosno geometrijsku nelinearnost, kontakt te materijalnu nelinearnost. Kada su inercijske sile dovoljno male ili jednake nuli uvodi se pojam statičke ravnoteže. Eksplicitna dinamika je matematička tehnika koja integrira jednadžbe gibanja po vremenu. Ona se u Abaqusu [3] temelji na metodi ekspilicitne integracije koja je još poznata kao Eulerova metoda ili kao metoda središnjih razlika. Kao i kod svake kompliciranije analize potrebno je paziti na računalno vrijeme i taj je problem posebno izražen u Abaqus/Explicit metodi. Računalno vrijeme povećava se usitnavanjem mreže konačnih elemenata te ovisi o tome da li je problem ravninski ili prostorni. Tako, na primjer, usitnjavnjem trodimenzionalnog modela sa faktorom 2 dovodi do toga da se u sve tri osi broj konačnih elemenata dvaput povećava te stoga računalno vrijeme eksponencijalno raste. Problemi smanjivanja računalnog vremena rješavaju se skaliranjem masa i metodom eng. *Selective subcycling* [9]. Česta pogreška koju javlja solver kod eksplicitne analize je preveliki Courantov broj (eng. *Deformation speed warning* [9]) te se on rješava vremenskim skaliranjem, usitnjavanjem mreže i promjenom načina inkrementiranja. Promatrajući jednadžbu (3.1), vidljivo je da je ona diferencijalna jednadžba drugog reda, što znači da će zahtijevati određene početne uvjete kako bi se mogla riješiti.

3.1 Određivanje vremenskog koraka

Kako je dinamika ovisna o vremenu po kojemu se ujedno i integrira, potrebno je odabrati stabilan vremenski korak, odnosno korak dovoljno malen kod kojega je rješenje dovoljno točno. Taj zahtjev određuje se pomoću Courantova uvjeta koji kaže da propagirajući val ne

može putovati brže od brzine u konačnom elementu s najmanjom dimenzijom (uz napomenu da se taj uvjet razmatra za svaki korak posebno) te glasi:

$$\Delta t \leq f \cdot \left[\frac{h}{c}\right]_{\min}, \tag{3.2}$$

gdje je Δt stabilan vremenski korak, h najmanja dimenzija konačnog elementa i c brzina propagirajućeg vala.

Brzina propagirajućeg vala c, dobiva se prema sljedećoj jednadžbi:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \tag{3.3}$$

gdje je E Youngov modul elastičnosti, a ρ gustoća.

Iz ove dvije jednadžbe, može se zaključiti da tri parametra mogu smanjiti računalno vrijeme odnosno povećati stabilan vremenski korak. Prvi je očito veličina konačnog elementa, no ako bismo se odlučili za taj korak moramo biti sigurni da je geometrija relativno jednostavna te da mali broj konačnih elemenata može dati dovoljnu točnost. Drugi parametar je Youngov modul elastičnosti te, ako bi se on umjetno spustio za neku vrijednost, točnost izračunatih naprezanja i deformacija biti će uvelike pogrešna. Zato se treba posvetiti trećem parametru, gustoći. Kod ovakvih problema teži se umjetno povećati gustoću najmanjega elementa kako bi se povećao stabilni vremenski korak. Takav postupak nazivamo skaliranjem masene matrice. Skaliranje masene matrice može se provesti na cijelome modelu ali može se i podijeliti geometrija i skalirati samo jedan dio modela. Postavljanje vremenskog koraka može se napraviti na dva načina: ručno odrediti vremenski korak što često dovodi do prekida analize ili automatski odrediti vremenski korak i tako prepustiti softveru da sam računa veličinu koraka. Automatsko inkrementiranje analize može se provesti na dva načina:

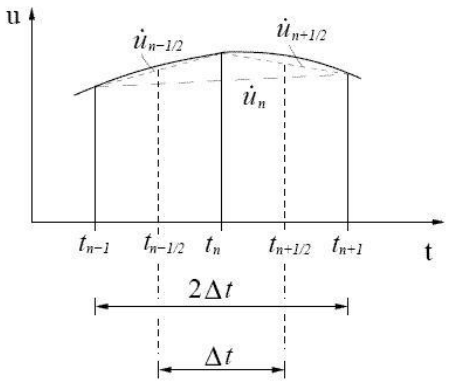
- **element po element** – (eng. *Element by element*) konzervativnija metoda sa mnogo inkremenata, daje dugu analizu te sa strane točnosti rezultata daje zadovoljavajuće rezultate,
- **globalni izračun** – (eng. *Global estimation*) standardna metoda koja je standardno zadana od strane programa, ima više inkremenata od prvog načina te je potrebno računalno vrijeme još duže.

3.2. Skaliranje masene matrice i dijagonalne matrice

Eksplicitna dinamička analiza koja se provodi metodom konačnih elemenata obično zahtijeva znatno računalno vrijeme jer nije ovisna samo o veličini elementa koji se analizira i broju konačnih elemenata, već i o vremenskom koraku. Veliko računalno vrijeme iziskuje znatne troškove u proizvodnji zbog čega je pronađen način kako ga smanjiti, uz uvjet da točnost rješenja ostane ista. Prvi logičan način za smanjivanje računalnog vremena je pretvoriti masenu matricu u dijagonalnu (eng. *lumped matrix* [3]). Prilikom provođenja statičke analize nema potrebe za ovakvim pojednostavljenjem jer masa ne utječe na rezultat. No kada se analizira problem vibracija i dinamike onda je ovaj pristup izuzetno bitan. Dijagonalna matrica znatno smanjuje vrijeme računanja jer je inverz matrice trivijalan. Kako je navedeno u poglavlju 3.1., gustoća je parametar koji će diktirati veličinu vremenskog koraka. Skaliranje masene matrice je automatski proces od strane softvera koji se aktivira kada korisnik odabire najmanji vremenski korak i gustoću te algoritam pomoću tih uvjeta preraspoređuje gustoću kako bi skratio vrijeme računanja. Iako je ova metoda efikasna kod problema kojima je kinetička energija znatno manja od unutarnje, ima mnogo mana kod onih problema gdje prevladava kinetička energija, kao i kod onih kod kojih masa ima značajnu ulogu u rješenju [3]. Iako je ovaj postupak izrazito bitan i efikasan, potrebno je ocijeniti da li je moguće provesti ga razmatrajući pritom koje elemente možemo skalirati te koliko ih možemo skalirati, s obzirom da je točnost obrnuto proporcionalna dodanoj masi [7].

3.3. Metoda središnjih razlika

Metoda središnjih razlika jedna je od osnovnih numeričkih metoda za rješavanje nelinearnih problema koja je implementirana u programskome paketu Abaqus, ali i mnogim drugima, poput LS-DynA [4] i Siemens Femap [5]. Ova metoda je naširoko poznata i primjenjiva kod rješavanja problema nelinearne dinamike, ali i problema konvekcijsko-difuzijskih jednadžbi u mehanici fluida jer su analitička rješenja prekompleksna, a u nekim slučajevima čak i nemoguća. Metoda ima još dvije inačice: eksplicitnu metodu razlika (eng. *forward method difference*) i implicitnu metodu razlika (eng. *backward method difference*) koje su slične osnovnoj metodi, ali s obzirom da nisu česte u algoritmima računalnih paketa neće se posebno isticati. Osnovna metoda središnjih razlika (3.4-3.6) temelji se na tome da računa sadašnji trenutak, uzimajući u obzir trenutak prije i trenutak poslije, te dijeli s dvostrukim korakom koji se odabire ručno ili se uzima standardni korak izračunat od strane programskog paketa.



Slika 4. Metoda središnjih razlika [3]

Brzina se izračunava pomoću formule (3.4):

$$\dot{u}_n = \frac{1}{2\Delta t}(u_{n+1} - u_{n-1}), \tag{3.4}$$

gdje Δt predstavlja vremenski inkrement, a u_{n+1} i u_{n-1} predstavljaju pomak u prethodnom trenutku, odnosno u budućem trenutku. Akceleracija se dobiva na sličan način, gdje se uzima polovica vremenskog korak:

$$\begin{aligned} \ddot{u}_n &= \frac{1}{\Delta t}\left(\dot{u}_{n+\frac{1}{2}} - \dot{u}_{n-\frac{1}{2}}\right) \\ &= \frac{1}{\Delta t}\left(\frac{u_{n+1}-u_n}{\Delta t} - \frac{u_n-u_{n-1}}{\Delta t}\right) \\ &= \frac{1}{(\Delta t)^2}(u_{n+1} - 2u_n + u_{n-1}). \end{aligned} \tag{3.5}$$

Ravnoteža u vremenu t_n za sustav s n stupnjeva slobode gibanja izračunava se pomoću jednadžbe (3.6):

$$\boldsymbol{M}\ddot{u}_n + \boldsymbol{C}\dot{u}_n + \boldsymbol{K}u_n = \boldsymbol{P_n}, \tag{3.6}$$

gdje je $\ddot{u}_n$ vektor ubrzanja s n stupnjeva slobode i $\dot{u}_n$ vektor brzina s n stupnjeva slobode.

3.4. Početni uvjeti

Kako bi se riješila već navedena diferencijalna jednadžba drugog reda, potrebno je zadati početne uvjete. Početni uvjeti zadaju se u čvorovima ili elementima, a Abaqus posjeduje mnogo tipova početnih uvjeta za različite analize poput: povezane kontaktne površine, početne lokacije za obogaćene elemente i mnoge druge među kojima su prethodno definirana polja (eng. *Predefined field*) te se za razmatrani problem zadaje početna brzina čvorova. Prilikom zadavanja početne brzine mora se paziti na konzistentost sa svim rubnim uvjetima, pogotovo ako postoje rubni uvjeti koji se mijenjaju u ovisnosti o vremenu.

4. MATERIJALNI MODEL PLASTIČNOSTI

U mehanici kontinuuma postoje dva modela za opisivanje diskretizacije kontinuuma: Lagrangeov i Eulerov opis. Kod Eulerovog opisa konačni elementi su vezani za prostor, dok Lagrangeov pristup može opisati konačne elemente koji su također vezani za prostor, ali se mogu i kretati. Lagrangeov pristup je široko primijenjen kod dinamike i mehanike fluida te će se rabiti prilikom razmatranja problema udara zrna u kacigu. Također, Lagrangeov pristup se koristi i u svim literaturama koje opisuju udar projektila, ali i kod drugih, sličnih dinamičkih problema, a uz to je i manje računalno zahtjevan [6]. Kod ovakvih analiza postoji veliki problem distorzije elemenata uslijed velikih deformacija, zbog čega se koriste i alternativni pristupi. Jedna od najpoznatijih alternativnih metoda je metoda hidrodinamike izglađenih čestica ili SPH metoda (eng. *Smoothed particle hydrodynamics*) koja je bezmrežna te samim time eliminira problem distorzije elemenata, no ona je korištena pri izuzetno velikim brzinama zrna, preko 1300 m/s, gdje se zrno ponaša kao fluid. Kombinirana Lagrange-Eulerova metoda također je jedan mogući pristup rješavanju, gdje se tijelo kod kojeg se pojavljuju velike deformacije opisuje Eulerovim pristupom, dok se ostalo opisuje Lagrangeovim pristupom. Distorziju elemenata još je moguće opisivati pomoću adaptivnog umrežavanja, ali je takav pristup računalno zahtjevan.

4.1. Materijalni model

Za razliku od većine problema kod kojih se koristi elastično ponašanje materijala i Hookeov zakon, te se nakon rasterećenja materijal vraća u početni položaj bez zaostalih deformacija, ovdje će se razmatrati plastično ponašanje konstrukcije kod koje dio deformacije trajno ostaje. Kako bi se to opisalo, potrebno je primijeniti materijalne modele koji to opisuju. Takvi materijalni modeli razvijeni su većinom za metale, no znaju se koristiti i za druge materijale poput betona, kamena i ostalih. Neki česti materijalni modeli su:

- **standardni model plastičnosti -** koristi se pri relativno niskim temperaturama za monotona opterećenja, bazira se na Misesovoj plohi tečenja te može opisati izotropno očvršćenje, Abaqus ga preporuča kod analiza kolpasa i sudara;
- **modeli za ciklička opterećenja: model za linearno kinematsko očvršćenje i model za nelinarno izotropno/kinematsko očvršćenje -** ova dva modela mogu opisati Baushingerov efekt i plastični kolaps, koriste se za niskociklični lom;

- **Johnson-Cook model -** ovaj materijalni model se koristi za probleme s velikim deformacijama, koristi Misesovu plohu tečenja i koristi se za adijabatske dinamičke analize;
- **modeli za opisivanje dinamičkog loma ili model smičnog loma i model vlačnog loma -** ovi modeli ponuđeni su za primjenu mehanike loma, koriste se u kombinaciji sa Johnson-Cook i Misesovim modelima, prednost im je što se mogu koristiti za kvazistatičke i dinamičke modele.

Ovo su samo neki od ponuđenih materijalnih modela za plastičnost koji su potencijalno primjenjivi za razmatrani problem. Postoji niz drugih plastičnih modela, kao što su: model za lijevano željezo, model za opisivanje puzanja, viskoplastični model, Oak-Ridge model i konstitutivni model, koji u ovome slučaju nisu upotrebljivi. Za problem udara zrna u kacigu uzimat će se Johnson-Cook materijalni model jer je najčešći u literaturi koja se bavi ovakvim problemima, ali i zbog dostupnosti podataka koji postoje za ovakav model [2].

4.1.1. Johnson-Cook model

Materijalni model Johnson-Cook opisan je sljedećom konstitutivnom jedndažbom:

$$\sigma_T = \left[A + B \cdot \varepsilon_{\mathrm{pl}}^{n}\right] \cdot \left[1 + C_1 \cdot \ln \frac{\varepsilon'_{\mathrm{pl}}}{\varepsilon'_0}\right] \cdot \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_{\mathrm{melt}} - T_0}\right)^{m}\right] \ , \tag{4.1}$$

gdje je parametar A konvencionalna granica tečenja, B i n su parametri koji opisuju očvršćivanje uslijed deformacija, C_1 je konstantna brzina deformacije, a parametar m opisuje mekšanje uslijed povećanja temperature. Prva zagrada u izrazu pokazuje ovisnost naprezanja tečenja o plastičnoj deformaciji, druga prikazuje ovisnost naprezanja tečenja o brzini deformacije, dok treća pokazuje ovisnost o temperaturi. Formula uključuje efekte očvršćivanja i mekšanja materijala uslijed povišenja temperature, no ti efekti nisu međusobno povezani te je upravo to nedostatak ovog materijalnog modela. Navedeni nedostatak će se zanemariti budući da se neće uzimati efekt mekšanja i očvršćivanja materijala. Iz jednadžbe (4.1) vidljivo je da naprezanje ovisi o pet parametara: A, B, C_1, n i m. Ovih pet parametara dobiva se eksperimentalno, ispitivanjem materijala statičkim vlačnim pokusom te ispitivanjima na Split-Johnsonovoj šipci pod različitim uvjetima.

Također postoji i modificirani Johnson-Cook materijalni model koji je definiran sljedećom konstitutivnom jednadžbom (4.2):

$$\sigma_T = \left[A + B \cdot (\varepsilon_{\mathrm{pl}})^n\right] \cdot \left[1 + \frac{\varepsilon'_{\mathrm{pl}}}{\varepsilon'_0}\right]^{C_2} \cdot \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_{\mathrm{melt}} - T_0}\right)^m\right]. \tag{4.2}$$

Razlika između standardnog i modificiranog Johnson-Cook materijalnog modela je u tome što parametar više nije C_1 već C_2 koji također određuje utjecaj brzine deformacije na naprezanje tečenja, ali nije iste vrijednosti. Model koji opisuje inicijaciju i propagaciju pukotine u materijalu opisan je pomoću parametra D koji je određen:

$$D = \sum D_{\mathrm{c}} \frac{\Delta\varepsilon_{\mathrm{pl}}}{\varepsilon_{\mathrm{ekv^f}}}, \tag{4.3}$$

gdje je $\Delta\varepsilon_{\mathrm{pl}}$ inkrementalno opterećenje plastične deformacije u jednom koraku, a $\varepsilon_{\mathrm{ekv^f}}$ je ekvivalentna deformacija pri lomu. $\varepsilon_{\mathrm{ekv^f}}$ se računa zamijenjujući konstante iz (4.1) s oznakama za lom $D_{1\text{-}5}$.

$$\varepsilon_{\mathrm{ekv^f}} = \left[D_1 + D_2^{D_3 \cdot \sigma^*}\right] \cdot \left[1 + D_4 \ln \frac{\varepsilon'_{pl}}{\varepsilon'_0}\right] \cdot \left[1 + D_5 \frac{T - T_0}{T_{\mathrm{melt}} - T_0}\right], \tag{4.4}$$

gdje σ^* predstavlja bezidmenzijski omjer hidrostatskog i ekvivalentnog opterećenja, a parametri D_1 do D_5 služe za određivanje ekvivalentne plastične deformacije pri lomu. Oštećenje u materijalu opisano je parametrom D koje za vrijednost nula označuje da ne postoji nikakvo oštećenje u materijalu, dok za D = 1 označuje lom materijala. U mehanici kontinuuma, parametar D je opisan kao omjer površine koji zauzimaju pukotine i šupljine u odnosu na početnu površinu presjeka. Autori Johnson i Cook predvidjeli su da njihov materijalni model ne opisuje dovoljno dobro lom u materijalu, odnosno lom se eksperimentalno dogodi prije nego što numerički predvidi ovaj model. Iz tog razloga jednadžba se modificirala (4.3) i uveo se novi parametar D_c:

$$D = \sum \mathrm{Dc} \frac{\Delta\varepsilon_{pl}}{\varepsilon_{ekvf}} \ . \tag{4.5}$$

U jednadžbi (4.5), lom se događa kada parametar oštećenja dostigne vrijednost parametra loma D_c, što ne znači nužno da je jednako 1, te se također izraz za ekvivalentnu deformaciju mijenja u izraz

$$\varepsilon_{\mathrm{ekv}^{\mathrm{f}}} = \left[D_1 + D_2^{D_3 \cdot \sigma^*}\right] \cdot \left[1 + \ln \frac{\varepsilon'_{\mathrm{pl}}}{\varepsilon'_0}\right]^{D_4} \cdot \left[1 + D_5 \frac{T - T_0}{T_{melt} - T_0}\right] . \tag{4.6}$$

Kao što je već spomenuto, ovakav materijalni model podrazumijeva adijabatski proces odnosno pretpostavlja da se toplina koja nastaje kod udara ne stigne prenijeti kroz materijal, već se zadržava u zoni udara te uzrokuje povišenje temperature. Izraz za povišenje temperature prikazuje se preko Taylor-Quinneyeve konstante:

$$\Delta T = \int_0^{\varepsilon_{\mathrm{pl}}} \lambda \frac{\sigma_{\mathrm{T}}}{\rho c_{\mathrm{p}}} d\varepsilon_{\mathrm{pl}} . \tag{4.7}$$

4.2. Brisanje konačnih elemenata

Prilikom propagacije pukotine i prolaska kroz materijal, simulacija udara te osobito kod simulacija postupaka obrade odabire se opcija brisanja konačnih elemenata. Ova metoda ima znatne prednosti, poglavito sa strane distordiranosti konačnih elemenata koji bi potencijalno mogli narušiti analizu, odnosno zaustaviti je. Ipak, najveći nedostatak je taj što se brisanjem konačnih elemenata oduzima masa i energija sustavu. Algoritam softvera funkcionira tako da prilikom brisanja konačnog elementa oduzima se istom sva naprezanja te su jednaka nuli i samim time ne pridonose energiji. Nadalje, ako element ima više integracijskih točaka, on se neće izbrisati sve dok svaka integracijska točka ne bude imala naprezanje jednako nuli. Kriterij kod kojega Abaqus počinje s brisanjem konačnih elemenata je sljedeći:

$$\sigma = (1 - D)\sigma', \tag{4.8}$$

gdje D predstavlja varijablu oštećenja, koja kada dođe do $D_{\max}$, koji je standardno propisan kao 1, počinje brisati konačne elemente iz sustava. Kako bi se omogućila ova opcija potrebno je napraviti dva koraka: kod zadavanja svojstava elemenata u programskome paketu Abaqus odabrati opciju *Element deletion* te odabrati izlazni podatak za *Status* varijablu. *Status* varijabla je varijabla koja je definirana prema izračunatim podacima u zadanom vremenskom koraku te predstavlja kriterij koji, kada je zadovoljen, briše konačni element.

4.3. Kontakt

Zadavanje kontakta igra veliku ulogu u analizama vijčanih spojeva, simulacijama procesa proizvodnje, mehanici loma i dinamičkim analizama. Razvoj algoritma za kontakt značajno je evoluirao te više nije nužno ručno označavati svaki konačni element koji će biti u kontaktu i zadati mu rubno ograničenje, već je moguće odabrati dvije vrste kontakta koje pokrivaju sve slučajeve. Razlika između kontakta u Abaqus/Standardu i Abaqus/Explicitu nije velika i, gledajući u input dokumentu, gotovo sve vrste kontakta se identično nazivaju. Ono što ih razlikuje je formulacija kontakta. Dok se u Implicit/Standardu zadaje preko master-slave formulacije, u Explicit modulu se zadaje povezivanjem čvor-površina i rub-rub.
Postoje dva algoritma pri zadavanju kontakta:

- opći oblik kontakta,
- odabir kontaktnih parova.

Opći oblik kontakta (eng. *General contact*) omogućuje definiranje kontakta za cijeli model, bazira se na Penalty metodi, baziran je za kompleksnije modele s više dijelova, primjenjuje se za dvodimenzionalne i trodimenzionalne probleme, znatno je brži kod kompleksnijih problema i zahtijeva manje odabira od strane korisnika. Prilikom analize samo jedan definirani opći kontakt može biti aktivan te je kod algoritma on ovisan o sljedećim varijablama:

- Hertzovom pritisku,
- normalnoj kontaktnoj sili,
- smičnoj sili trenja,
- smičnom naprezanju,
- svim rezultantama na površini (sile, momenti, itd.).

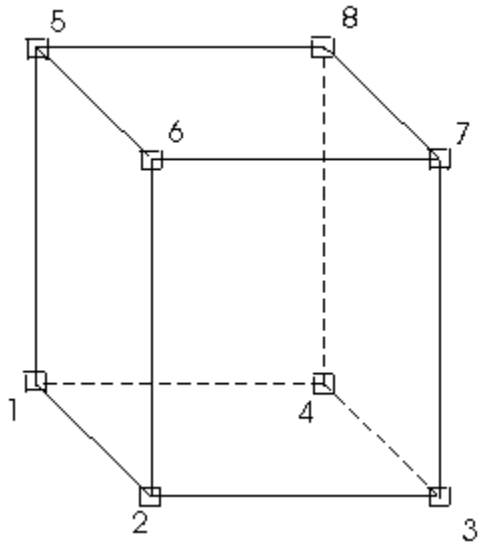
Ograničenja ove vrste kontakta su: toplinski kontakt, kontakt u kojemu koeficijent trenja ovisi o temperaturi, analitičke površine. Ove nedostatke moguće je ispraviti tako da se istovremeno s općim oblikom koriste i kontaktni parovi. Kontaktni parovi mogu definirati kontakt samo za dvije površine te nude dvije vrste algoritama: Penalty funkciju i kinematski kontakt, koji u većini slučajeva daju identične rezultate, osim prilikom elastičnih sudara gdje kinematski kontakt ne daje zadovoljavajuće rezultate. Budući da su obje vrste kontakata za razmatrani problem primjenjive, analiza će se temeljiti na općem obliku kontakta primarno zbog manjeg računalnog vremena, jednostavnije uporabe te lakšeg modeliranja samog kontakta.

4.4. Konačni elementi za eksplicitnu metodu

Abaqus nudi mogućnost dviju vrsta formulacija konačnih elemenata: standardnu forumulaciju i eksplicitnu formulaciju. Kao i kod standardne, eksplicitna pokriva sve vrste konačnih elemenata te je formulacija ista kao i za standardne konačne elemente, ali eksplicitni elementi koriste dijagonalnu matricu masa i razvijeni su za probleme velikih pomaka i deformacija. Prilikom rješavanja problema fokusirat će se na tri vrste elemenata: heksaedarske, tetraedarske te ljuskaste elemente. Razmatrat će se prednosti i nedostaci svih vrsta konačnih elemenata prema nekoliko kriterija: kvaliteta mreže i optimalan broj konačnih elemenata potreban za diskretizaciju, stabilnost rješenja i potrebno računalno vrijeme. Prilikom razmatranja kacige potrebno je paziti na prvi kriterij zbog same kompleksne geometrije, stoga će fokus biti upravo na tom kriteriju.

4.4.1. Heksaedarski elementi

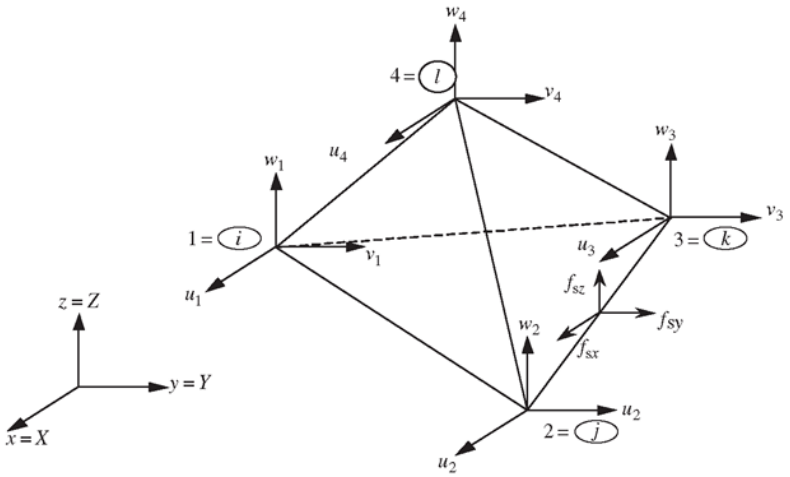
Heksaedarski konačni elementi su poliedroni sa šest površina, osam kuteva i dvanaest rubova, koji topološki odgovaraju kvadru. U programskome paketu Abaqus heksaedarski konačni elementi prvoga reda imaju naziv C3D8 dok za eksplicitnu formulaciju nisu ponuđeni heksaedarski konačni elementi višega reda, naziva C3D20 stoga se ne mogu koristiti. Heksaedarski konačni elementi jedni su od češćih elemenata koji se rabe u analizama metodom konačnih elemenata. Njihova karakteristika je velik broj stupnjeva slobode gibanja, točnije 24 kod linearne interpolacije, što proširuje matricu krutosti i naizgled povećava računalno vrijeme u odnosu na analizu s tetraedarskim konačnim elementima, ali to nije uvijek slučaj. Ovakvi elementi imaju mogućnost opisivanja višeg reda deformacije, dok su obični tetraedarski u mogućnosti opisivati samo konstantnu deformaciju. Heksaedarski elementi preporučuju se u gotovo svim simulacijama zbog bolje konvergencije rješenja i manjeg stabilnog vremenskog koraka, ali imaju veliki nedostatak što se ne mogu primjenjivati kod kompleksne geometrije,poput izrazito zakrivljenih površina.



Slika 5. Heksaedarski konačni element [3]

4.4.2. Tetraedarski konačni elementi

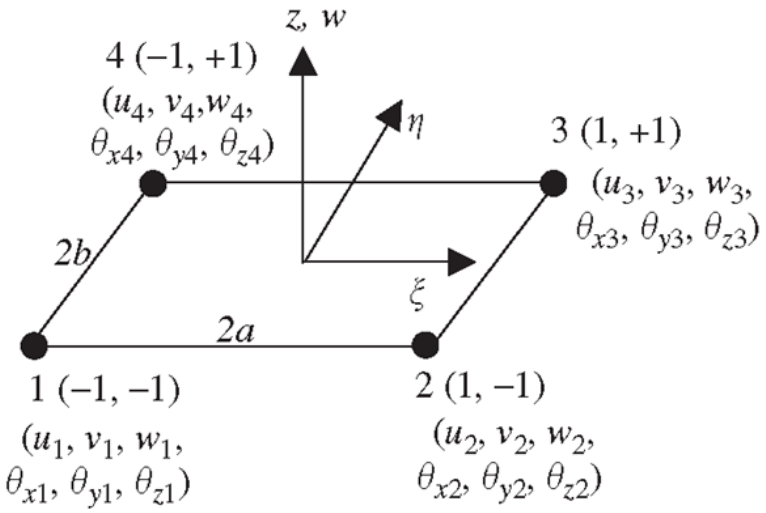
Tetraedarski elementi su popularni u analizi metodom konačnih elemenata (MKE) zbog svoje geometrijske prilagodljivosti te su često zadani kao osnovni elementi kod automatske diskretizacije. Njihov problem je taj da kada su formulirani u obliku prvog reda daju netočne rezultate zbog prevelike krutosti pa je potrebno jako progustiti mrežu da bi rezultati konvergirali. Kod takvih slučajeva to se rješava ili odabirom heksaedarskih konačnih elemenata ili odabirom tetraedarskih elemenata drugog reda.



Slika 6. Tetraedarski konačni element [3]

4.4.3. Ljuskasti konačni elementi

Ljuskasti konačni elementi česti su u uporabi, pogotovo kada se diskretizira zakrivljena geometrija ili kada je jedna dimenzija znatno manja od druge dvije. U Abaqusu postoji razlika između konvencionalnih i 3D ljuskastih elemenata. Ako se modelira pomoću konvencionalnih ljuskastih elemenata diskretizira se tijelo definirajući srednju plohu pa naknadno zadajući debljinu elementa, dok se primjenom 3D ljuskastih konačnih elemenata modelira čitavo tijelo i debljina je određena geometrijom čvorova. Prednosti ove vrste elemenata u odnosu na druga dva navedena konačna elementa za 3D analizu su brojne, a neke od njih su: računalno vrijeme je znatno manje kod ljuskastih elemenata, diskretizacija je znatno lakša te je potreban manji broj konačnih elemenata, kvaliteta mreže je veća, a, specifično za zakrivljene geometrije, manja je opasnost od *Shear-Lockinga* u odnosnu na 3D elemente.



Slika 7. Ljuskasti konačni element [3]

5. ABAQUS EXPLICIT VS. IMPLICIT

Abaqus/Standard pruža mogućnost rješavanja linearne i nelinearne analize, linearne dinamike, niskofrekventne dinamike, nelinearne – toplinske analize, kvazistatičke analize, termalno-električne analize i mnogih drugih, dok Abaqus/Explicit pruža mogućnost rješavanja kratkotrajne dinamike, nelinearne i kvazistatičke analize s velikim deformacijama, analize kolapsa i strukturalne akustike. Tehnički bi se razmatrani problem udara metka mogao riješiti i implicitnom analizom, ali navest će se razlozi zašto to ne bi bilo poželjno. Razlike između eksplicitne i implicitne analize su znatne, stoga će se ovdje navesti osnovne. Implicitna analiza ne temelji se na eksplicitnoj integracijskoj metodi objašnjenoj u poglavlju 2.1 već na Eulerovoj integracijskoj metodi. Ta metoda ima prednost sa stajališta stabilnosti vremenskog koraka koji će biti stabilan kod bilo kojeg velikog koraka, što se naziva neuvjetovana stabilna shema. Negativna značajka je vrijeme računanja prema Newton-Rapshonovoj metodi, gdje se kod svakog vremenskog koraka mora računati inverz matrice krutosti, što je računalno zahtjevan zadatak čak i za linearne sustave, a pogotovo za nelinearne gdje matica krutosti ovisi o pomaku te na taj način povećava vrijeme analize. Eksplicitna analiza zaobilazi tu metodu računanja inverza te polazi od jednadžbe:

$$\mathbf{m}x'' + \mathbf{k}x' + \mathbf{c}x = \boldsymbol{f}(t)\,, \qquad (5.1)$$

gdje x'' predstavlja akceleraciju, x' predstavlja brzinu, **k** faktor prigušenja, **c** konstantu krutosti i $\boldsymbol{f}(\mathrm{t})$ uzbudnu silu u funkciji vremena.

U jednadžbi (5.1) prvo se izračunava x'' za što treba inverz matrice masa koja je za konačne elemente nižeg reda dijagonalna matrica, što dodatno usporava proces izračunavanja inverza. Veliki nedostatak eksplicitne metode je taj što uzima u obzir Courantov broj za računanje dinamičkih pojava, koji je objašnjen u poglavlju 3.1., te zahtijeva kvalitetnu mrežu konačnih elemenata kako bi rješenje bilo stabilno, odnosno konvergiralo. Za razliku od eksplicitne, implicitna metoda kontrolira rješenje pomoću inercije [3] te se diskretizira prema deformaciji, a ne prema Courantovom broju. Implicitna metoda je zato bolja za probleme statičke, kvazistatičke analize i izvijanja, gdje se preferiraju veliki vremenski koraci koji ne bi bili mogući kod eksplicitne analize. Postoji mnogo primjera iz industrije gdje eksplicitna metoda ima znatnu prednost nad implicitnom, a jedan od njih prikazan je dolje na slici 8.

Na slici 8. prikazan je Jounce amortizer koji sprečava da se ovjes automobila kompresira, a izračunat je pomoću eksplicitne metode jer implicitna metoda ne uzima u obzir prigušenje i inerciju pa bi vrijeme trajanja analize bilo mnogostruko veće zbog računanja inverza matrice krutosti u svakome koraku.

Slika 8. Jounce amortizer [3]

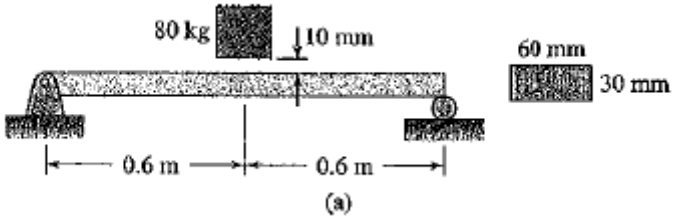
Neki drugi primjeri su:

- udarno opterećenje na plinski spremnik,
- centrifugalno opterećena gumenog obloga,
- uvijanje žice,
- spremnik pod tlakom,
- kovanje, jer uključuje mnoge efekte trenja i kontaktne rubne uvjete.

Razlika između implicitne i eksplicitne metode je u tome što eksplicitna metoda ne zahtijeva iteracije i konvergencije i jer zahtijeva znatno manji inkrement kako bi mogla provesti analizu. U svrhu zaključka može se reći da se eksplicitna metoda koristi kada se događaju velike deformacije i lomovi materijala te kada se analiziraju veći modeli koji ovom metodom zahtijevaju manje računalnih resursa.

6. USPOREDBA ANALITIČKOG RJEŠENJA SA ABAQUS/EXPLICIT

Kako bi se provjerila točnost rješavanja eksplicitne analize u Abaqusu koristit će se primjer udara mase u gredu. Zadatak prikazan na slici 9. rješava se analitički prema principima očuvanja ukupne energije putem kojih se izračunava statičko opterećenje te se zatim množi s faktorom udara. Pretpostavka je da se sva kinetička energija mase koja pada pretvara u energiju deformiranja tijela, uzimajući u obzir efikasanost sustava. S obzirom da će se zanemariti toplina izgubljena pri dodiru, neelastični odziv i akustika, može se razmatrati sustav sa stopostotnom iskoristivošću.



Slika 9. Udar mase u gredu [8]

6.1. Analitičko rješenje

U zadataku je zadan modul elastičnosti E = 200 GPa, masa utega m = 80 kg, visina h = 10 mm, duljina L = 1,2 m te su dimenzije pravokutnog poprečnog presjeka jednake širini a = 30 mm i dubini b = 60 mm.

Moment inercije pravokutnog poprečnog presjeka [1]:

$$I = \frac{b \cdot a^3}{12} = \frac{60 \cdot 30^3}{12} = 135x10^{-9}\text{m}^4. \tag{6.1}$$

Statički progib prema analitičkome izrazu iz [1] glasi:

$$\delta_{\text{st}} = \frac{(mg) \cdot L^3}{48EI} = 1{,}0464x10^{-3}\ \text{m}. \tag{6.2}$$

Za slučaj prikazan na slici gdje masa udara vertikalno u gredu, faktor udara prema [1] jednak je:

$$k = 1 + \sqrt{1 + \frac{2h}{\delta_{\text{st}}}} = 5{,}485. \tag{6.3}$$

Nakon što je izračunat faktor udara, množi se sa statičkom silom težine da bi se dobio iznos ekvivalentne sile na gredu koja se javlja uslijed udara utega mase:

$$F_{\text{udarno}} = k \cdot (mg) = 4305 \text{ N} . \tag{6.4}$$

Maksimalni moment savijanja iznosi:

$$M_{\max} = \frac{F_{\text{udarno}}}{2} \cdot L = 1291{,}5 \text{ Nm} . \tag{6.5}$$

Maksimalno opterećenje javlja se na sredini grede na vanjskom rubu presjeka te iznosi:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{I} \cdot \frac{\text{h}}{2} = 143{,}5 \text{ MPa}. \tag{6.6}$$

6.1.2. Numeričko rješenje

Zadatak je riješen pomoću analize primjenom Abaqus/Explicit. Greda je kreirana kao trodimenzijska jer je nemoguće dodati kontaktna svojstva za dvodimenzijske probleme, dok se za masu odabrao oblik kugle kako bi dodir bio linijski, a ne površinski, te kako bi rezultati bili što bliži analitičkim. Polumjer kugle odabrao se na reverzibilan način, poznavajući zadanu masu te gustoću materijala (7800 kg/m^3). U modulu *Assembley* kugla je pozicionirana kao na slici 10. Prilikom zadavanja kontakta težilo se tome da energijska bilanca ostane očuvana pa je zato odabran kontakt bez trenja. Gibanje u eksplicitnoj analizi zadaje se preko naredbe *Predefined field* te se zadala brzina izračunata ručno pomoću formule slobodnog pada prema [1]. Brzina se izračunava pomoću formule (6.7):

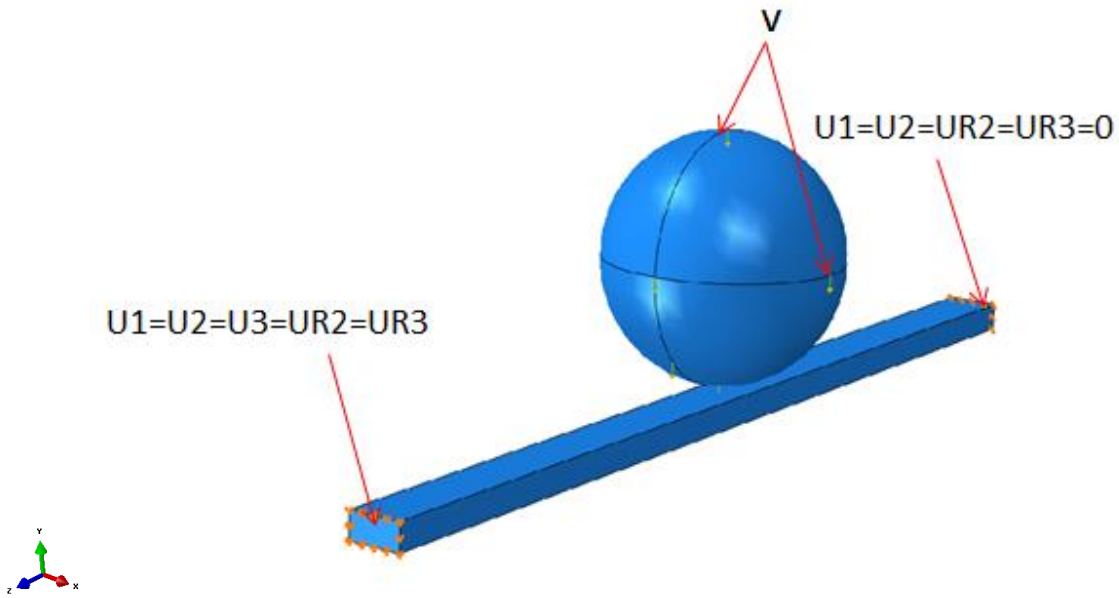
$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} , \tag{6.7}$$

gdje *v* predstavlja brzinu, dok se vrijeme analize određuje pomoću formule (6.8):

$$t = \frac{s}{v}, \tag{6.8}$$

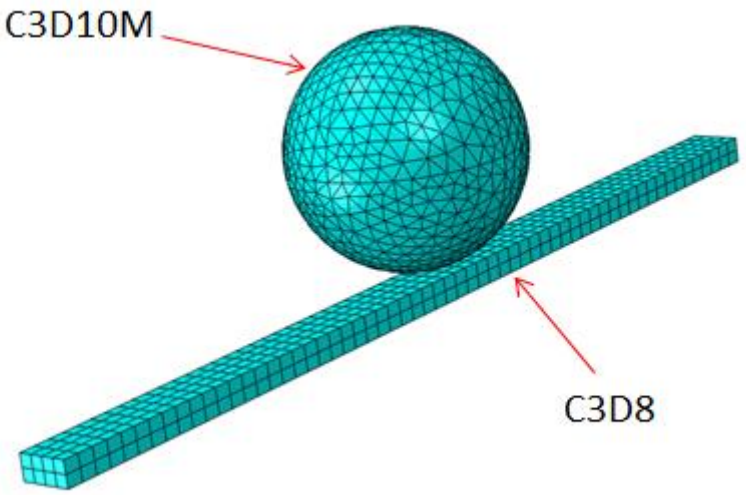
gdje *s* predstavlja prijeđeni put koji je u ovome slučaju jednak visini *h*.

Iz formule (6.7) dobiva se iznos brzine od 441 mm/s dok se pomoću (6.8) određuje vrijeme analize u trajanju od 0.0252 sekundi. Pošto je masa, tj. uteg, modelirana kao kugla nije bilo moguće koristiti heksaedarske elemente, već su upotrijebljeni tetraedarski elementi. Na slici 10. prikazan je numerički model sa zadanom brzinom i rubnim uvjetima, dok je na slici 11. prikazana mreža konačnih elemenata.



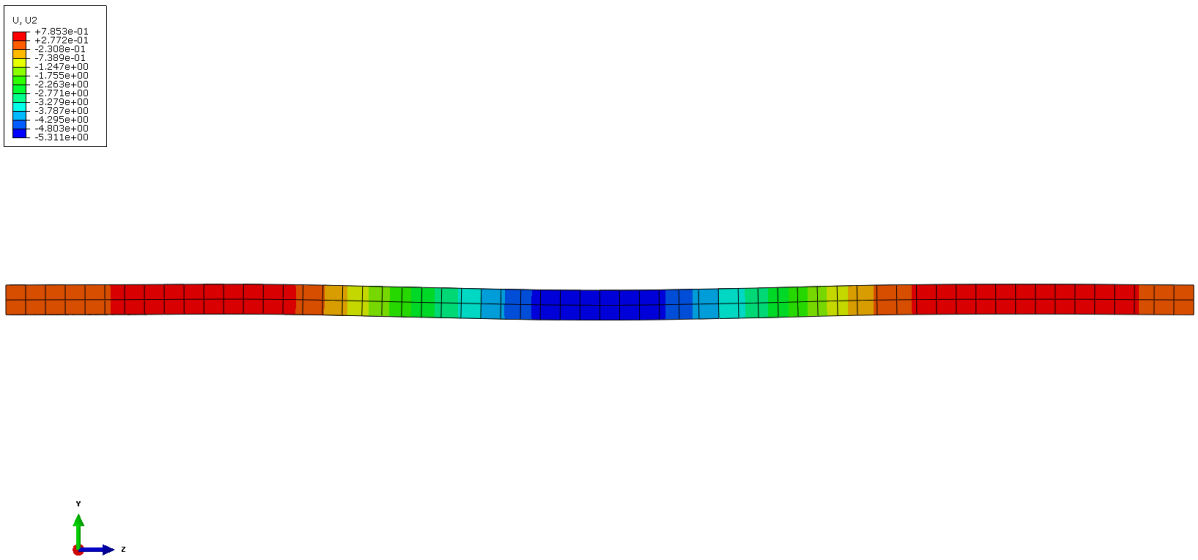
Slika 10. Rubni uvjeti i opterećenja

Kao što je vidljivo sa slike 11., za diskretizaciju grede koristili su se heksaedarski elementi tipa C3D8 te se greda diskretizirala sa svega 500 konačnih elemenata. Kugla se diksretizirala s tetraedarskim konačnim elementima C3D10M te se koristilo 6800 konačnih elemenata.

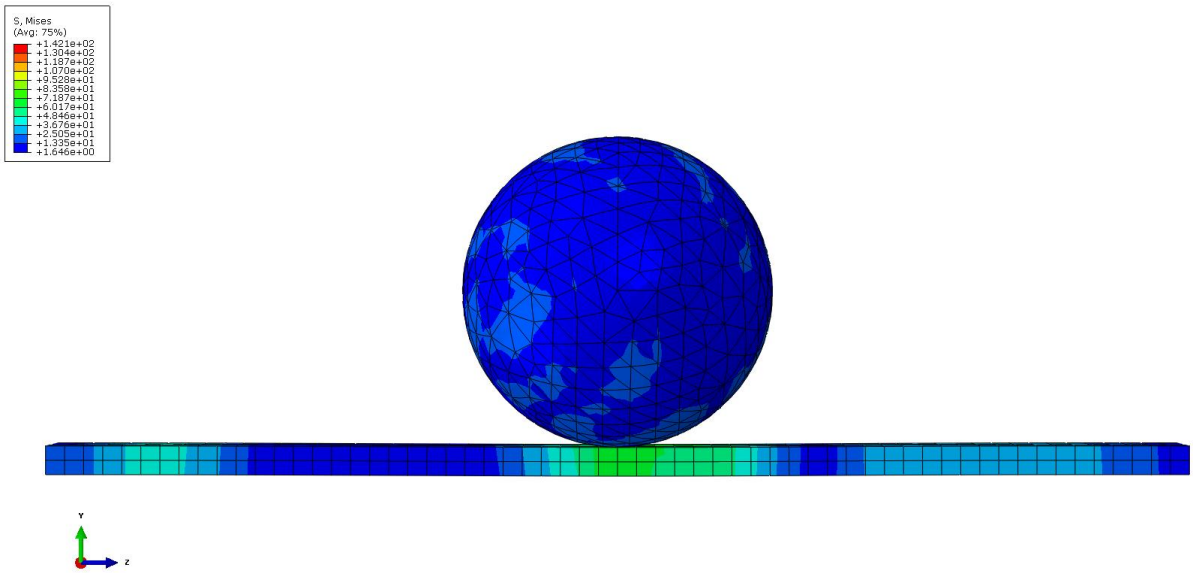


Slika 11. Mreža konačnih elemenata

Na slici 12. prikazani su rezultati pomaka i naprezanja uslijed udara mase u gredu.



a)



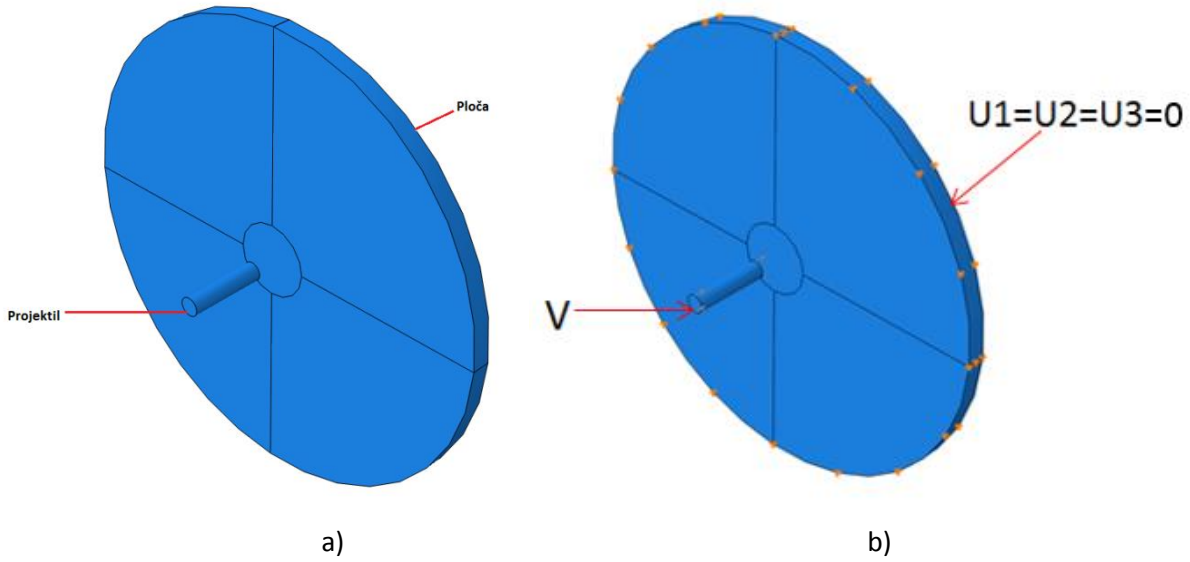
b)

Slika 12. Prikaz: a) pomaka, b) naprezanja

Kao što se može vidjeti na slici 12.a) dinamički progib dobiven numeričkim putem iznosi 5,31 mm dok je analitički jednak umnošku statičkog progiba s faktorom opterećenja te iznosi 5,4 mm. Maksimalno naprezanje javilo se na dodiru kugle i grede, što je bilo i očekivano, te je odstupanje od analitičkog rješenja svega dva posto. No, treba imati na umu da je cijeli model opisan sa svega 7000 konačnih elemenata, što nije preveliki broj, stoga se može zaključiti da bi rješenje još više konvergiralo prilikom povećanja broja konačnih elemenata.

7. VALIDACIJA KONAČNIH ELEMENATA

Na slici 13. prikazan je numerički model ploče i ravnog projektila. Na ploči se spriječio pomak u sva tri smjera, dok je projektilu zadana brzina u iznosu od 338 m/s. Težina projektila iznosi 250 grama, dok je duljina projektila 83 mm prema [4].



Slika 13. a) Numerički model, b) rubni uvjeti i opterećenja

Kako bi se uvidjele mogućnosti uporabe različitih elemenata proveden je test za usporedbu između eksperimentalno dobivenih podataka [9] te simulacija s različitim gustoćama mreže i različitim vrstama konačnih elemenata. Kako bi se pojednostavio slučaj u odnosu na [9], koristio se sudar s elastičnim projektilom jer bi uvođenje plastičnosti dodatno zakompliciralo analizu. Plastičnost ploče zadala se preko Johnson-Cook materijalnog modela objašnjenoga u poglavlju 3.2. Parametri koji se popunjavaju su sljedeći: A predstavlja konvencionalnu granicu tečenja, B i n su parametri koji opisuju očvršćenje uslijed deformacije, C_1 je konstantna brzina deformacije, m je parametar koji opisuje mekšanje uslijed djelovanja temperature, $\dot{\varepsilon}$ je brzina deformacije, $\dot{\varepsilon}_0$ je referentna brzina deformacije, dok su T_0 i T_{melt} sobna, odnosno temperatura tališta materijala.

Tablica 1. Podaci za materijalni model ploče i zrna [9]

Johnson-Cook model	A / MPa	B / MPa	n	m	C	$\dot{\varepsilon}$ / 1 / s
Weldox ploča	262	162,1	0,2783	1,34	-	-
Zrno	1430	2545	0,7	1,03	0,014	0,15

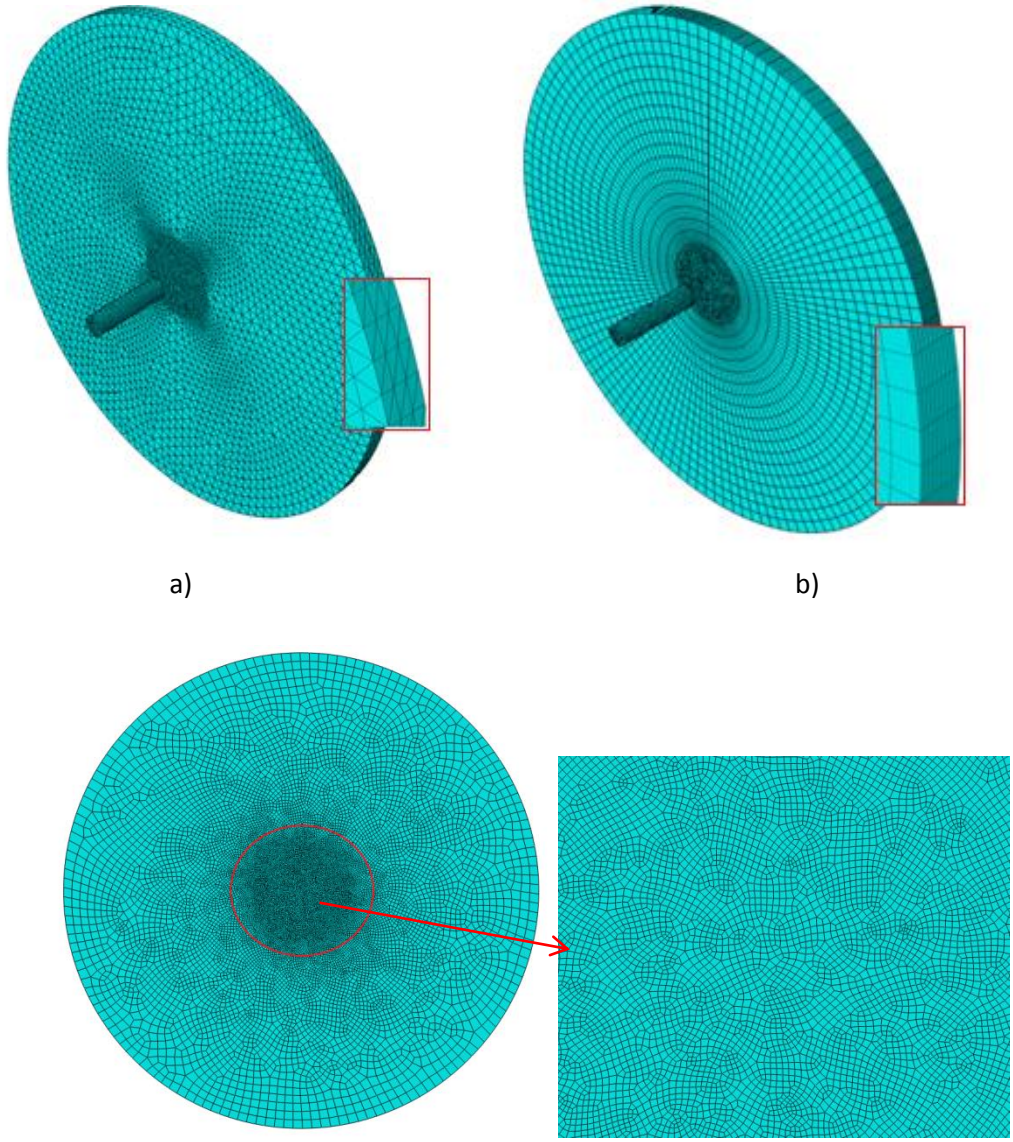
Osim podataka za plastičnost moramo zadati i kriterij dinamičkog loma za čeličnu ploču, koji se, kao i za plastičnost, određuje eksperimentalno, te su u ovome primjeru uzeti sljedeći podaci navedeni u tablici 2. Parametri d_1, d_2, d_3, d_4, d_5 dobiveni su eksperimentalno tako da se čelična ploča podvrgnula udaru drugoga materijala, također zrna, pri točno određenoj brzini koja će se i u ovoj simulaciji koristiti, te se uza sve to mora naznačiti propagacija loma (eng. *Damage Evolution*) i označiti koliki je početni pomak koji se događa kod loma – ovdje je uzet 0,9. Kreiranje presjeka standardno je kao i kod linearne analize, a presjek je zadan kao homogeni, trodimenzijski (eng. *Solid-Homogeneous*).

Tablica 2. Dodatni podaci za materijalni model ploče [4]

Johnson-Cook model	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	T_{melt} / K	T_0 / K	$\dot{\varepsilon}_0$
Weldox ploča	-0,77	1,45	0,47	0	1,6	651,85	20,05	1

7.1. Usporedba vremena

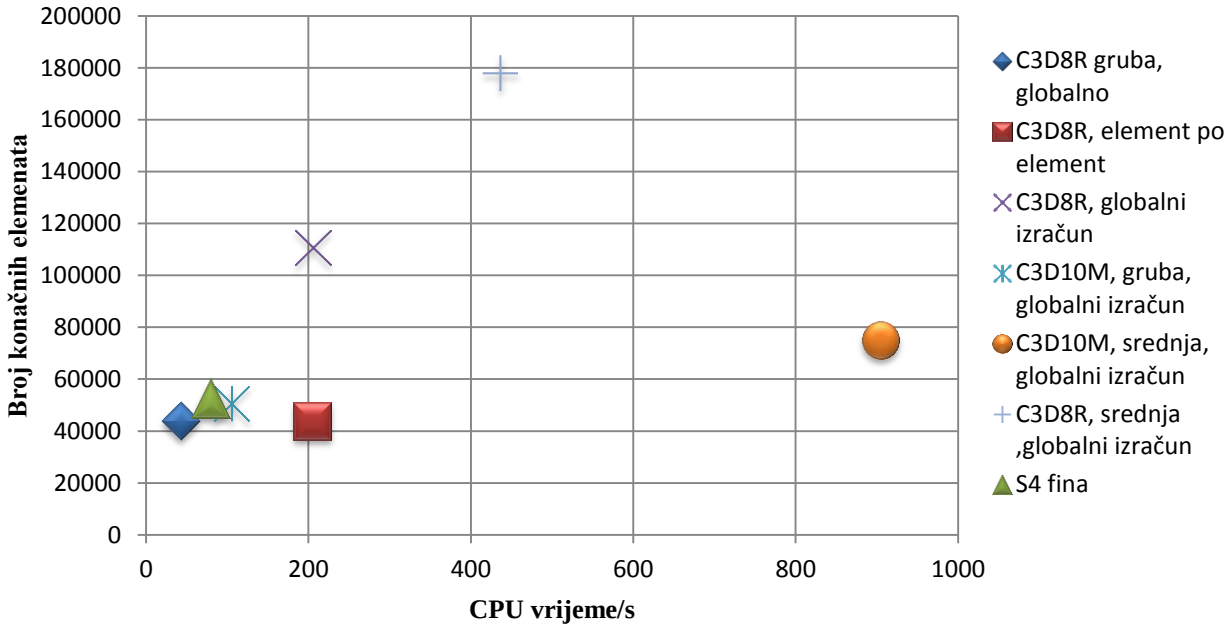
Na slici 14. vidljiva je mreža konačnih elemenata sa 68500 C3D10M elemenata kojima je diskretizirana okrugla ploča te 5166 C3D8R elemenata kojima je diskretiziran projektil. Osim elemenata C3D10M koji su tetraedarski elementi za eksplicitnu analizu, koristili su se C3D8R heksaedarski elementi te ljuskasti S4R elementi kako bi se usporedila konvergencija, stabilan korak, vrijeme analize i drugi parametri. Težilo se također diskretizaciji modela i po debljini, kako bi sam proces bio što bolje opisan, te se diskretiziralo sa četrdesetak elemenata po debljini.



Slika 14. a) diskretizirana ploča sa C3D10M, b) diskretizirana ploča sa C3D8, c) diskretizirana ploča sa S4R, d) konačni elementi središta ploče

Prilikom provođenja analize koristila se paralelizacija sa 6 računalnih jezgri i dva načina računanja vremenskoga koraka: **globalni izračun** i **element po element**, koji su već opisani u poglavlju 3. Koristio se Johnson-Cook materijalni model očvršćivanja te elastični projektil. Usporedba trajanja analiza u odnosu na broj konačnih elemenata dana je u dijagramu na slici 15. Analiza s tetraedarskim konačnim elementima može stvarati probleme zbog distordiranosti samih elemenata. Ako se geometrija ne dijeli tada sami algoritam u Abaqusu daje relativno povoljnu mrežu konačnih elemenata, s malo ili ništa distordiranih elemenata, ali

problem je što se tada ne može dobro obuhvatiti zona udara projektila uz razuman broj konačnih elemenata. S druge strane, ako se podijeli geometrija, zona udara se može dobro diskretizirati, ali moguće je da se javi velik broj distordiranih konačnih elemenata, koji ili mogu zaustaviti analizu ili je produžiti jer zahtijevaju manji vremenski korak. Analiza će se provoditi pomoću Abaqus/Explicit.



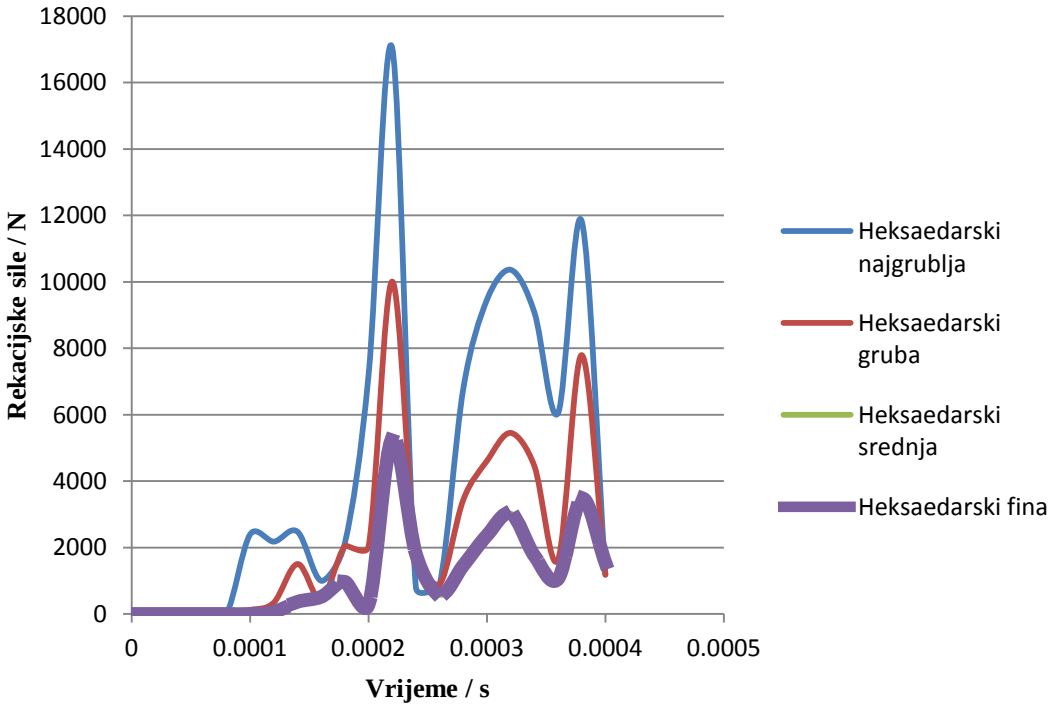
Slika 15. Usporedba vremena analiza

Vidljivo je da je sa stajališta vremena daleko najpovoljnija analiza s ljuskastim S4R končanim elementima pomoću kojih se dobivaju točni rezultati u kratkome vremenu, dok je usitnjena tetraedarska mreža daleko najnepovoljnija.

7.2. Usporedba rješenja

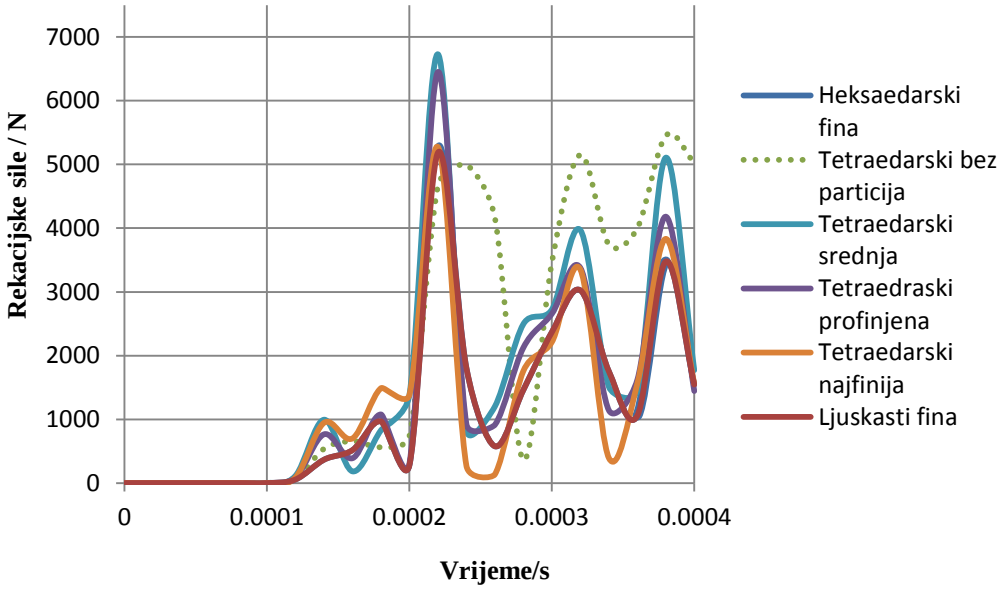
Za referentnu vrijednost uzet će se analiza heksaedarskih elemenata sa 177906 elemenata, budući da je to jedina analiza koja ima dovoljno velik broj konačnih elemenata te verifikacijom daje najkvalitetniju mrežu. Na slici 16. prikazana je usporedba heksaedraskih konačnih elemenata. Radi jednostavnosti razmatrale su se reakcijske sile u točki na obodu ploče te su se koristile četiri mreže konačnih elemenata: najgrublja sa 17000 elemenata, gruba

sa 44000, srednja sa 110000 i fina sa 180000 elemenata. Vidljivo je da su rješenja identična već nakon 110000 konačnih elemenata jer je razlika između srednje i fine mreže svega 0,1%.



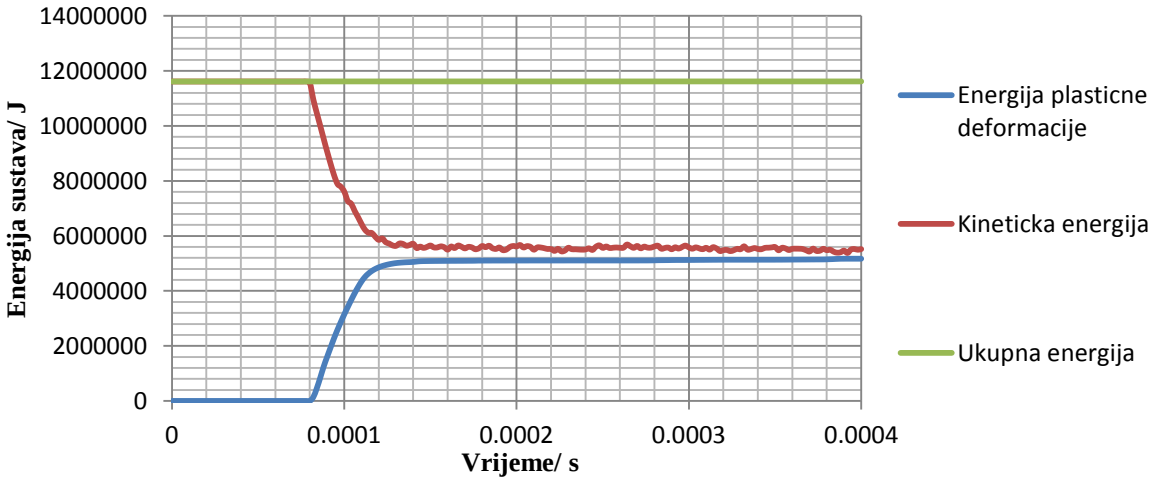
Slika 16. Usporedba rješenja heksaedarskih elemenata

Na slici 17. napravljena je usporedba tetraedarskih i ljuskastih konačnih elemenata u odnosu na heksaedarsku mrežu sa 110000 elemenata prema istome principu (reakcijske sile na obodu). Kao što se može vidjeti, tetraedarski elementi uvelike se razlikuju od heksaedarskih elemenata. Isprekidanom linijom na slici 17. dobiveni su rezultati s nepodijeljenom geometrijom. Vidljivo je da takva analiza nije točna, već, štoviše, ona sa vremenom divergira u donosu na heksaedarsku mrežu. Ako se podijeli geometrija, rješenja su realnija ali se poklapaju tek za najfiniju mrežu od 187023 konačnih elemenata. S druge strane, ljuskasti S4R konačni elementi daju dobru konvergenciju te malo trajanje analize pa će se stoga fokusirati na njih.



Slika 17. Konvergencija tetraedarskih elemenata

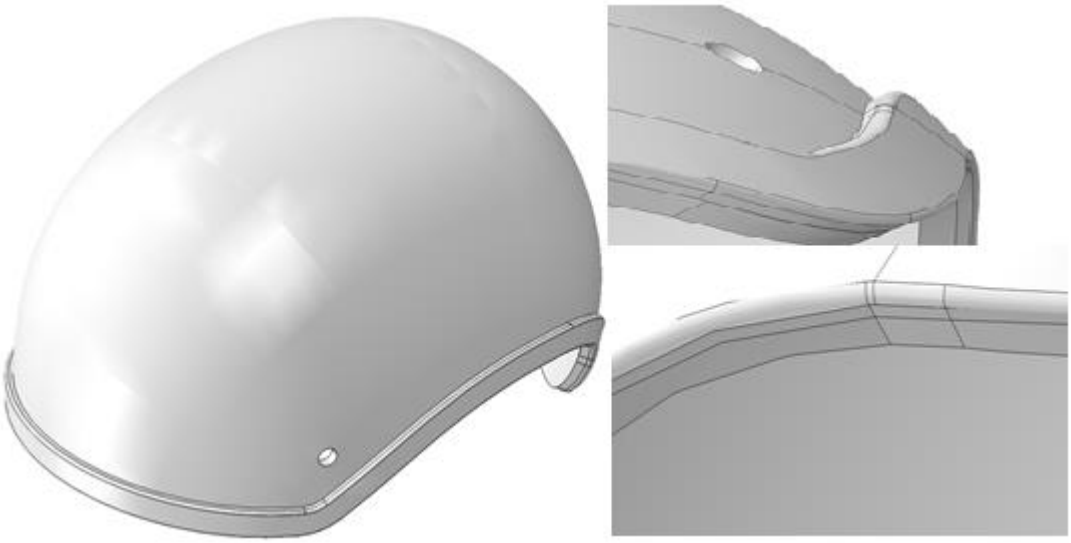
Iz provedene usporedbe konačnih elemenata može se zaključiti da je heksaedarski konačni element znatno stabilniji, zahtijeva manji inkrement zbog čega je i sama analiza brža te u konačnici pravilno konvergira, ali njegov nedostatak je taj što nije primjenjiv na kompleksnu geometriju kakva će se ovdje razmatrati. Upravo zato koristit će se ljuskasti elementi s profinjenom mrežom, posebice u području udara, ali će se pokušati i analiza s tetraedarskim oblikom konačnih elemenata. Također, može se prikazati kako se energija ponaša prilikom analize. Na slici 18. vidljivo je kako se kinetička energija troši na stvaranje plastičnih deformacija i lom.



Slika 18. Promjena energija tijekom vremena

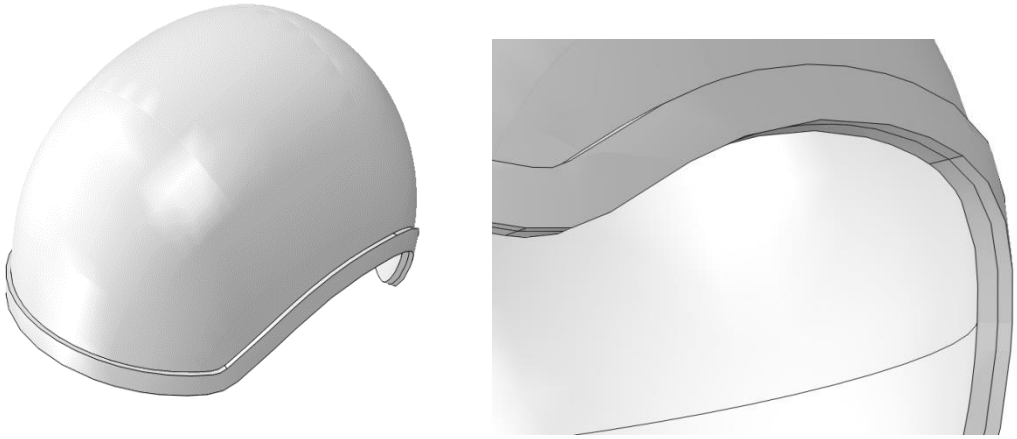
8. ANALIZA UDARA PROJEKTILA U KACIGU

Za temu diplomskog zadatka odabrana je vojna kaciga modela BK6, čija je geometrija preuzeta sa [6]. Za razliku od problema razrađenog u poglavlju 7., geometrija prikazana na slici 19. je znatno zahtjevnija te ne postoji mogućnost kreiranja mreže heksaedarskih konačnih elemenata.



Slika 19. Izgled osnovnog modela kacige [6]

Osim što postoji nemogućnost kreiranja navedene heksaedarske mreže, zbog svih silnih zaobljenja, rupa i kratkih rubova nije moguće diskretizirati konstrukciju s kvalitetnom C3D10M ili S4R mrežom. Kratki rubovi uzrokuju preveliki kut spljoštenosti tetraedarskog konačnog elementa, a zaobljenja, kao i rupe, zahtijevaju preveliki broj konačnih elemenata kako bi se diskretizirali. Zato će se geometrija „počistiti“ koristeći opcije poput spajanja površina (eng. *Combine Faces*) i automatske topologije (eng. *Automatic virtual topology*), kako se prilikom analize ne bi javljali predistordirani konačni elementi koji uzrokuju manji stabilni korak, a samim time i duže vrijeme računanja, ili koji prekidaju analizu. Na slici 20. prikazana je pojednostavljena geometrija. Za materijal se odabrao čelik čiji su podaci za zrno i kacigu preuzeti sa [9]. Osim plastificiranja kacige ovdje se koristila i plastifikacija zrna kako bi simulacija bila što realnija.



Slika 20. Izgled pojednostavljenog modela kacige [6]

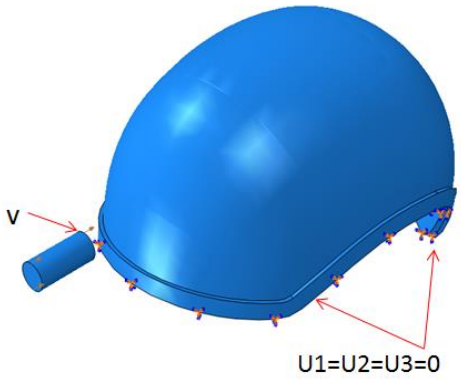
8.1. Validacija različitih vrsta mreže

Kako bi se dobila optimalna mreža konačnih elemenata prvotno se testirala kaciga diskretizirana s različitim mrežama konačnih elemenata koji su navedeni u tablici 3., koristeći pritom materijal uzet iz prethodne tablice 2. Svrha ovoga postupka je vidjeti kako se rezultati ponašaju s različitim vrstama mreža kod kompleksne geometrije te validirati da li je kombinacija heksaedarskih i tetraedarski elemenata valjana. Ovdje se nije težilo usitnjavanju mreže, već se diskretiziralo prema preporuci iz poglavlja 7. U tablici 3. navedene su različite vrste mreža konačnih elemenata podijeljene prema gustoći mreže uz naznačen broj konačnih elemenata.

Tablica 3. Podaci mreža konačnih elemenata

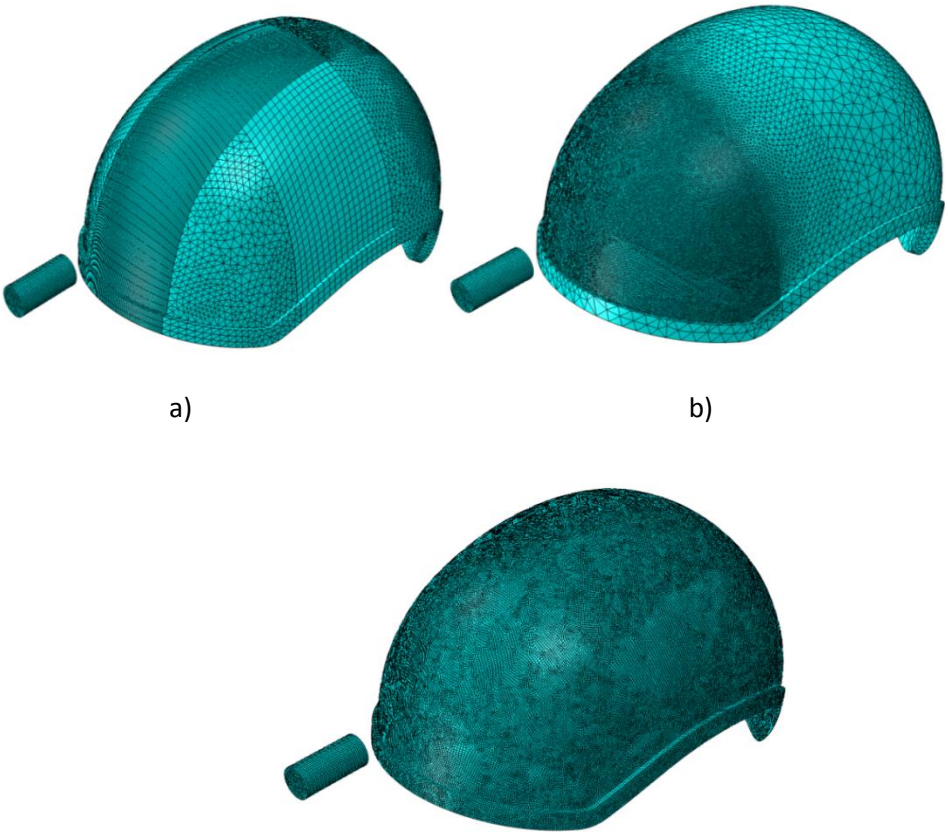
	Gustoća mreže		
Vrsta konačnih elemenata	Gruba	Srednja	Fina
Tetraedarski konačni elementi C3D10M	40214	61000	80000
Tetraedarski konačni elementi C3D10M i heksaedarski C3D8R	2748C3D8R + 13489 C3D10M	6972 C3D8R + 85243 C3D10M	162000
Ljuskasti konačni elementi S4R	10384	21322 C3D8R + 96832 C3D10M	95531

Na slici 21. nalazi se numerički model kacige i zrna s ravnim vrhom, uz naznačene početne i rubne uvjete.



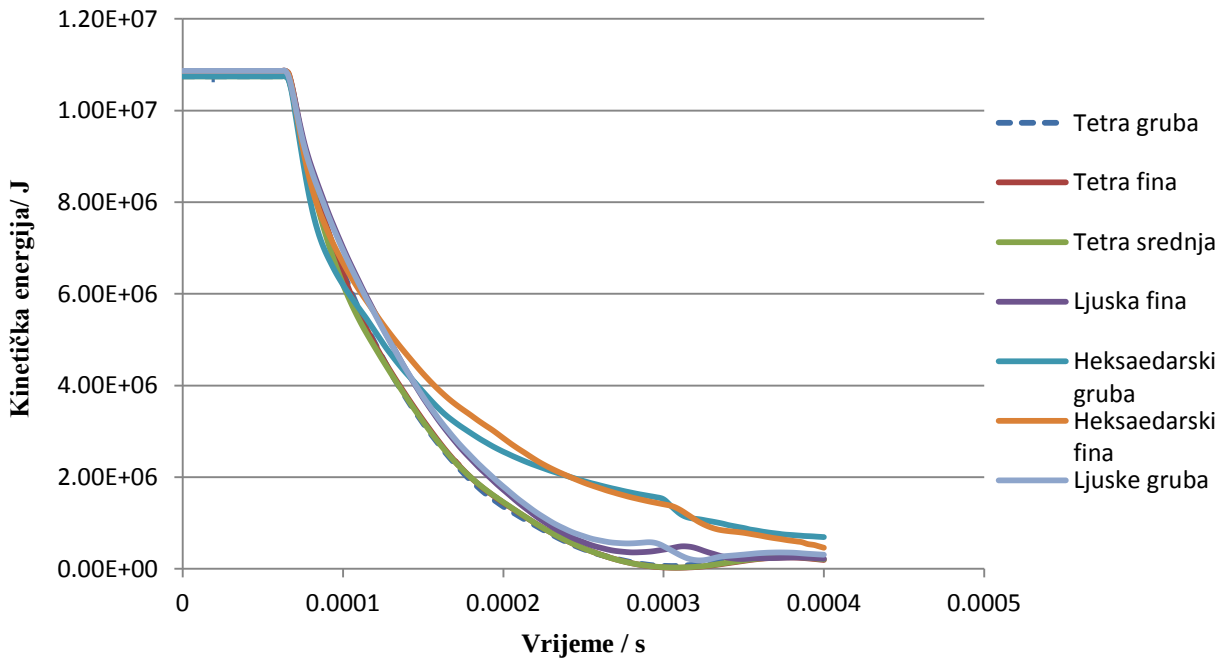
Slika 21. Numerički model kacige i zrna s rubnim i početnim uvjetima

Kaciga se diskretizirala s nekoliko vrsta konačnih elemenata te se za svaku koristilo više gustoća mreža. Na slici 22. prikazane su različite mreže konačnih elemenata, a podaci o vrsti i broju konačnih elemenata za svaku se pojedinu mrežu mogu naći u tablici 3.



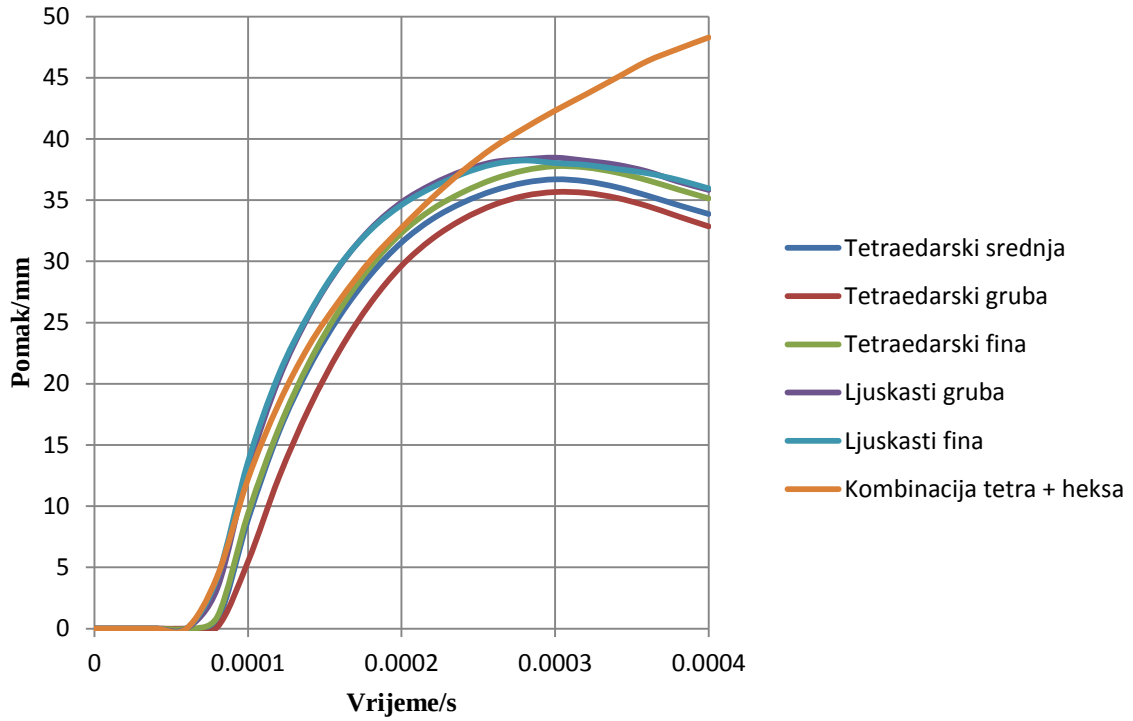
Slika 22. Kaciga diskretizirana pomoću : a) tetraedarskih i heksaedarskih, b) tetraedarskih, c) ljuskastih konačnih elemenata

Za materijal je potrebno zadati elastične karakteristike, plastične karakteristike, način popuštanja materijala te brzinu očvršćivanja materijala. Zbog same fizikalne prirode potrebno je definirati i kontakt između zrna i kacige kada dođe do udara. Za opis kontakta odabran je opći oblik algoritma (eng. *General Contact* [8]) jer je jednostavno primjenjiv i ima malo restrikcija [3] u odnosu na algoritam kontaktnih parova (eng. *Contact Pair* [8]). Analiza je kreirana u Step modulu te je odabrana Dynamic/Explicit vrsta analize. Vrijeme trajanja analize iznosi 0,0004 sekunde te su naznačeni podaci u analizi dobiveni preko izlaznih varijabli (eng. *Field Output History* [8]). Kako bi se ustvrdila izlazna kinetička energija projektila nakon udara, na slici 23. prikazan je dijagram kinetičke energije prvog materijala za različite vrste konačnih elemenata.



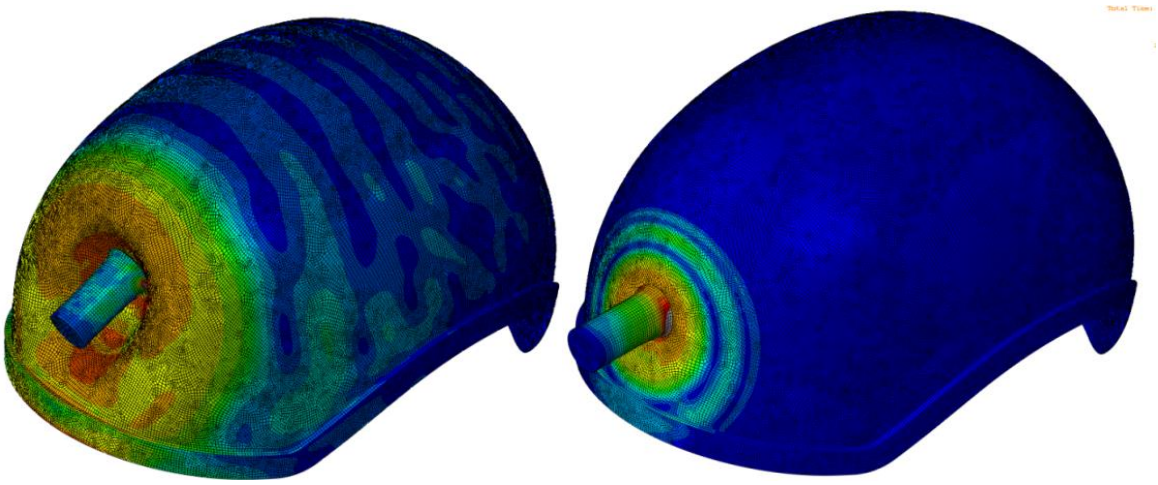
Slika 23. Izlazne kinetičke energije zrna

Osim izlazne kinetičke energije analizirao se i pomak u zoni udara zrna te su rezultati prikazani na slici 24. Sa slike 24. može se uočiti da se kombinacijom heksaedarskih i tetraedarskih konačnih elemenata dobivaju značajna odstupanja od rezultata dobivenih drugim vrstama konačnih elemenata. Mreža s velikim brojem elemenata daje slične rezultate kao i mreža s ljuskastm konačnim elementima, ali vrijeme trajanje analize iznosi 32 minute, dok za ljuskaste iznosi 11 minuta.

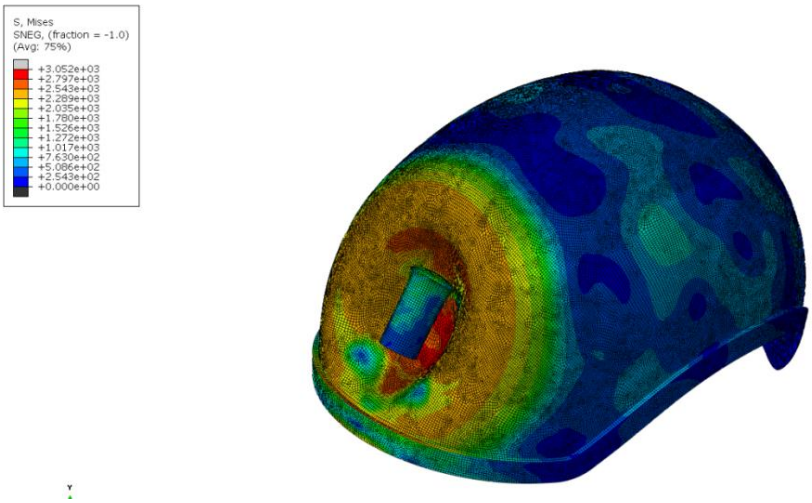


Slika 24. Pomak kacige uslijed udara zrna

Valja napomenuti da prilikom korištenja ljuskastih konačnih elemenata dolazi do automatskog reduciranja debljine konačnih elemenata od strane softvera te je taj problem moguće riješiti jedino pomoću dodavanja linije koda *NONPERIM=SELF koji zaustavlja automatsku redukciju debljine ljuskastih konačnih elemenata. Automatska redukcija događa se zato što je prilikom zadavanja kontakta nemoguće koristit ljusku debljine veće od 2 milimetra. Na slici 25. dana su naprezanja u više vremenskih koraka.



a) b)



c)

Slika 25. Vrijeme a) *t* = 0,00008 s, b) *t* = 0,00016 s, c) *t* = 0,00024 s

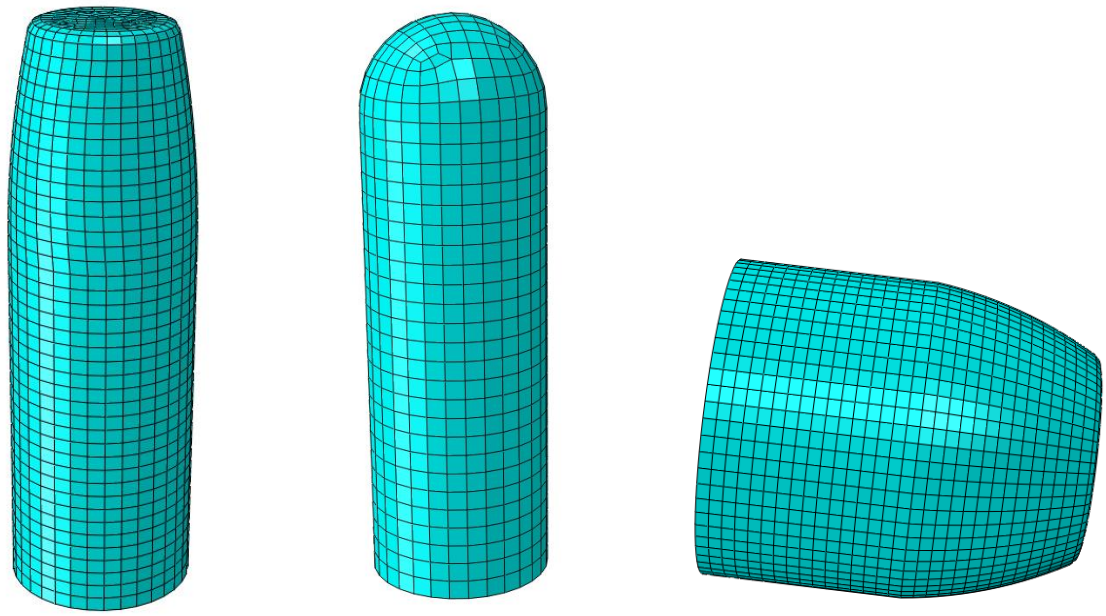
8.2. Numerički model

Za analizu udara koristila su se dva različita materijala čiji su podaci preuzeti iz [9] kacige, a njihove karakteristike navedene su u tablici 4. Materijal zrna zadan je u tablici 1., stoga se neće ponovno navoditi.

Tablica 4. Podaci za različite vrste materijala

Materijal	**WELDOX 460E**								
E / N/mm^2	ν	χ	c_p / J/K	ρ / kg/m3	T_{melt} / K	T_0 / K	$\dot{\varepsilon}_0$ / s^{-1}	A / N/mm^2	B / N/mm^2
200000	0,33	0,9	452	7850	1800	293	5 ·10−4	490	807
n	C	m	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5		
0,73	0,012	0,94	-0,0705	1,732	-0,54	0,0123	0		
	E72								
E / N/mm^2	ν, [-]	χ, [-]	c_p / J/ K	ρ / kg/m3	T_{melt} / K	T_0 / K	$\dot{\varepsilon}_0$ / s^{-1}	A / N/mm^2	B / N/mm^2
200000	0,33	0,9	452	7850	1800	293	0,015	1270	1580
n	C	m	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5		
0,175	0,012	1	0,1	0,4	-1,3	0,05	0		

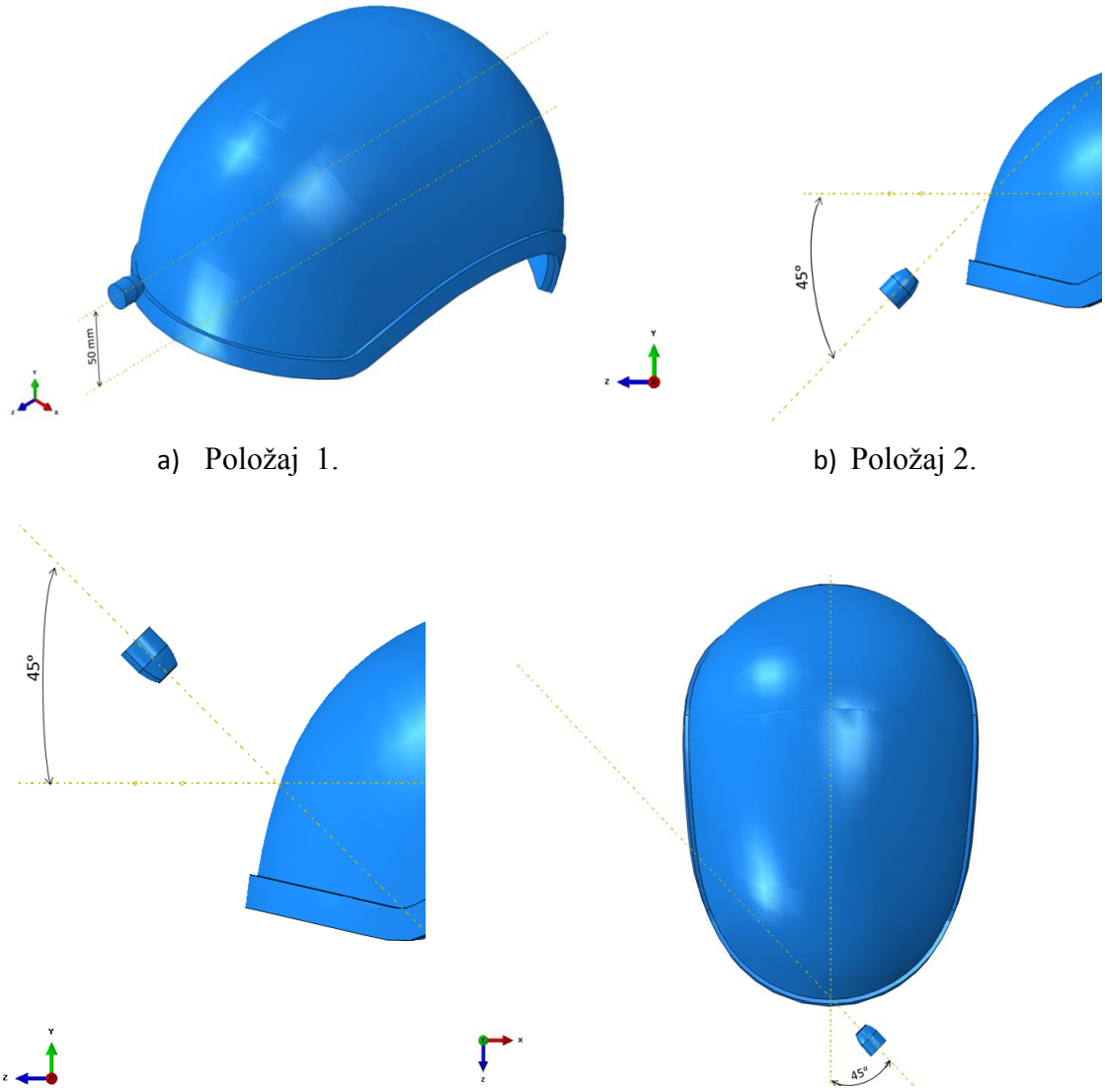
Ponašanje je opisano pomoću normalnog kontakta u slučaju kada zrno udara okomito na kacigu, dok je za udar zrna pod kutom provedena analiza i za normalni kontakt i za tangencijalni. Na slici 26. prikazana su zrna diskretizirana pomoću heksaedarskih konačnih elemenata. Kao što je navedeno u poglavlju 1. stražnji oblik zrna bitno je pojednostavljen jer ne utječe znatno na samo probijanje, a pojednostavilo se kako bi broj konačnih elemenata bio manji i samim time vrijeme trajanja analize kraće.



a) b) c)

Slika 26. Mreža konačnih elemenata za a)Winchester. 308 konusno, b) Winchester .308 polusferno i c) .45 ACP zrno

Provedena je analiza sa zrnom Winchester .308 te sa zrnom .45 ACP. Osim što će se koristiti više vrsta zrna, provest će se simulacije za četiri položaja zrna u odnosu na kacigu. Na slici 27. prikazana su četiri položaja gibanja zrna prema kacigi za provedbu analize. Kod položaja 1., prikazan na slici 27.a), zrno udara u smjeru uzdužne osi kacige, na visini od 50 milimetara gledano od donjeg ruba kacige. Položaj 2., slika 27.b), zakrenut je u odnosu na položaj 1. za 45 stupnjeva u pozitivnom smjeru oko osi *x*, dok je položaj 3. zakrenut također za 45 stupnjeva, ali u negativnom smjeru oko osi *x*, slika 27. c). Položaj 4. zakrenut je u odnosu na položaj 1. za 45 stupnjeva oko osi *y* (slika 27.d).



a) Položaj 1.

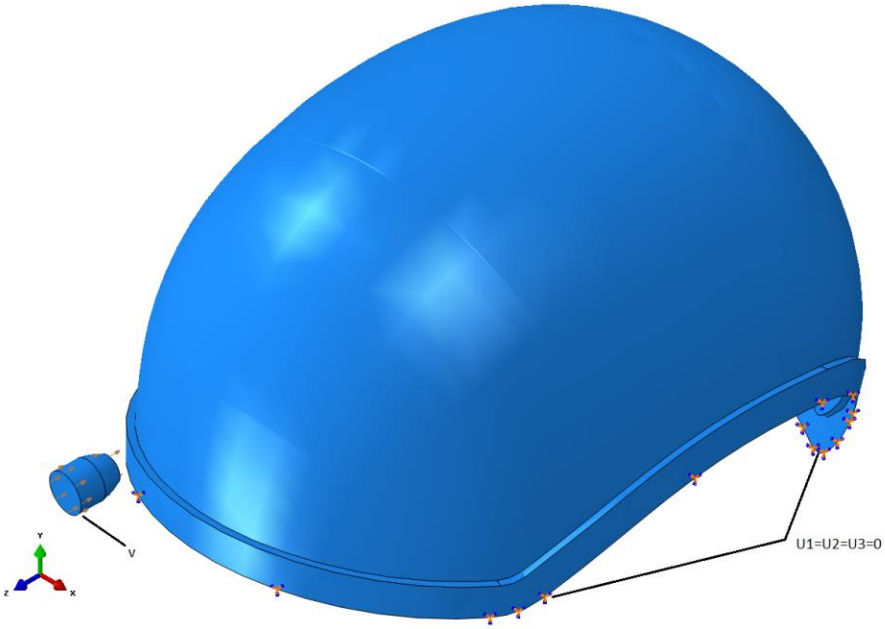
b) Položaj 2.

c) Položaj 3.

d) Položaj 4.

Slika 27. Prikaz položaja gibanja zrna prema kacigi

Na slici 28. prikazani su rubni uvjeti i opterećenja. Za rubni uvjet odabran je donji rub kacige kojemu je spriječen pomak, iako u stvarnosti to nije slučaj, već je ovo uzeto kao pojednostavljenje. Opterećenje se zadalo pomoću naredbe eng. *Predefined Field* te se za vrstu opterećenja odabrala brzina. Važno je napomenuti da se kao pretpostavka uzima ispaljivanje zrna sa male udaljenosti jer preuzeti podaci definiraju izlaznu brzinu zrna iz cijevi te je na taj način uzet faktor sigurnosti u obzir. Prilikom zadavanja izlaznih varijabli (eng. *Field Output*) osim standardnih varijabli pomaka, brzina i naprezanja odabralo se i praćenje *Status* varijabli koje pokazuju oštećenje i lom.

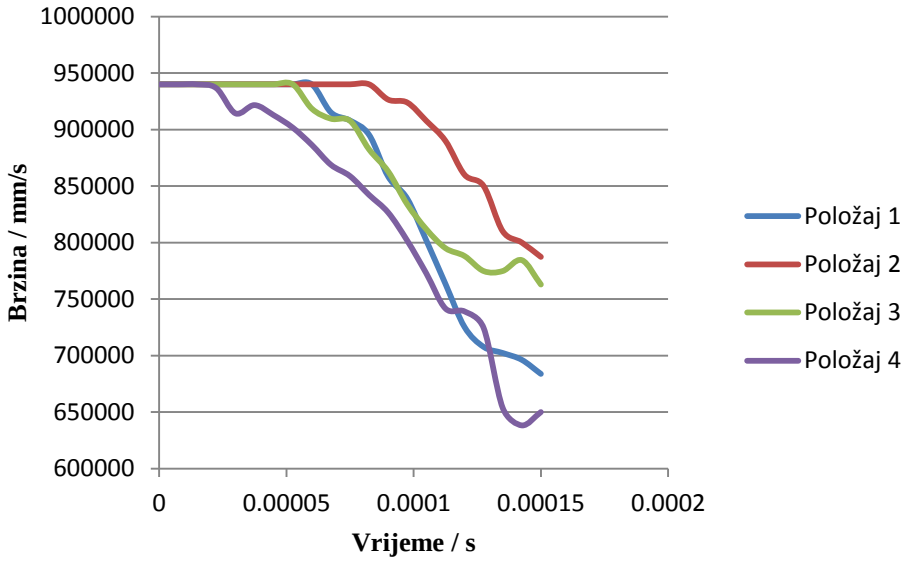


Slika 28. Prikaz opterećenja i rubnih uvjeta

8.2.1. Čelik E72

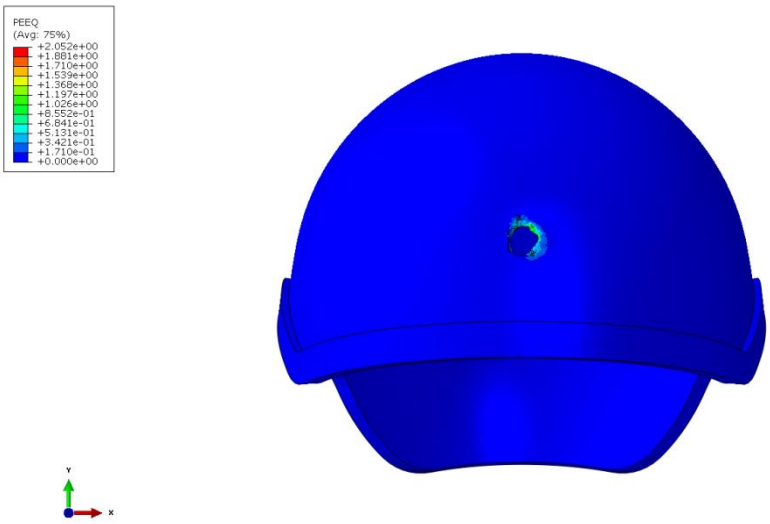
8.2.1.1. Winchester .308

Prva analiza je provedena koristeći navedeno zrno Winchester .308 u sva četiri položaja. Prilikom analiziranja položaja 1. provedene su dvije analize s polusfernim i konusnim zrnom kako bi se uvidjela deformacija oba zrna. Vrijeme analize iznosi 0,0015 sekundi zbog visoke vrijednosti brzine ovog zrna. Vrijeme analize odabrano je prema [5], koristeći proporcije brzina projektila u oba primjera te podešavanjem vremena reverzibilnim putem i to nakon što se duljom analizom nije detaljno obuhvatio proces udara, budući da se vremenski inkrement izračunava na temelju ukupnog vremena analize te na taj način kraće ukupno vrijeme simulacije daje manji automatski vremenski korak. Brzina iznosi 940 m/s, što je maksimalna izlazna brzina ovakvog zrna. Na dijagramu izlaznih brzina (slika 29.) vidljivo je da položaj 2. i uvjerljivo najmanje smanjuje ulaznu brzinu jer ne penetrira cijelim tijelom kroz materijal, već samo tangencijalno udara u kacigu teju na taj način oštećuje. Odstupanje od rezultata između položaja 2. i položaja 3. razlog su zakrivljenosti površina. Položaj 1. znatno smanjuje brzinu jer propagira kroz materijal i troši kinetičku energiju na stvaranje plastične deformacije i lom dok položaj 4. najviše smanjuju brzinu jer tijekom analize dvaput prolazi kroz materijal.



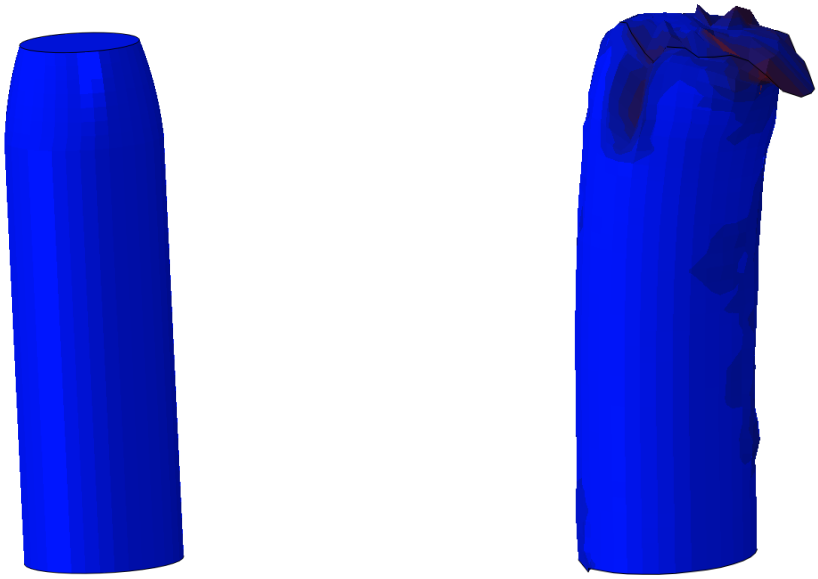
Slika 29. Dijagram izlaznih brzina

Na slici 30. prikazana je plastična deformacija u trenutku t = 0,0015 s za zrno s polusfernim završetkom. Vidljivo je da je rupa nastala prilikom udara metka u kacigu relativno pravilnoga oblika jer je kinetička energija udara izuzetno visoka te sami polusferni oblik takav da kod njega ne dolazi do značajnijeg plastificiranja, već on zadržava prvotni oblik.



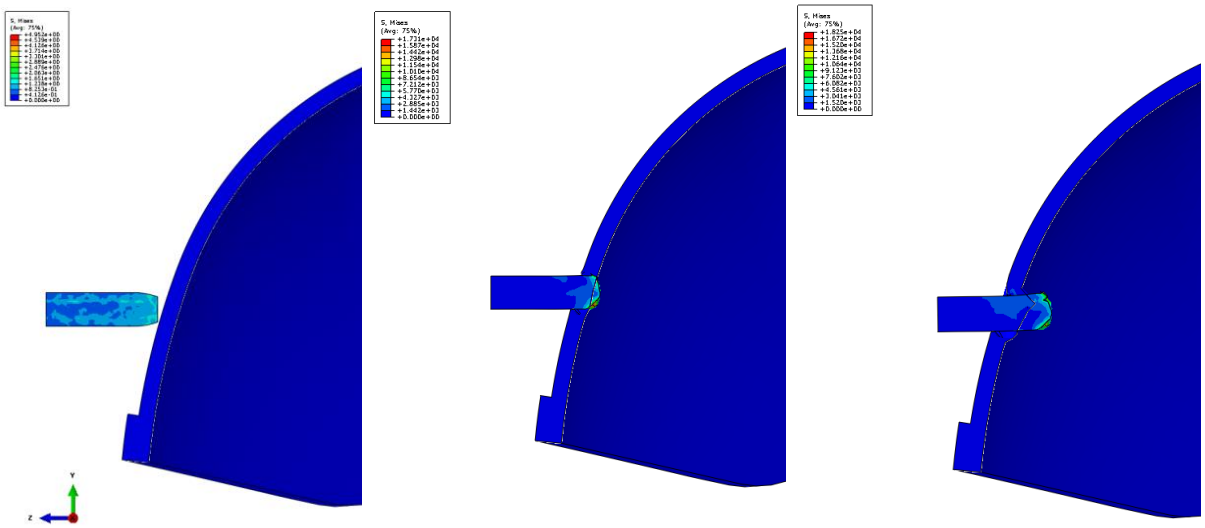
Slika 30. Položaj 1. (t = 0,0015 s)

Na slici 31. prikazan je oblik konusnog zrna prije udara i nakon udara. Vidljivo je da se događa znatna deformacija te se oblik vrha širi. Deformacija nije simetrična zato što metak ne ulazi u kacigu cijelom svojom površinom istovremeno, već donjim rubom ulazi prije, slika 32.



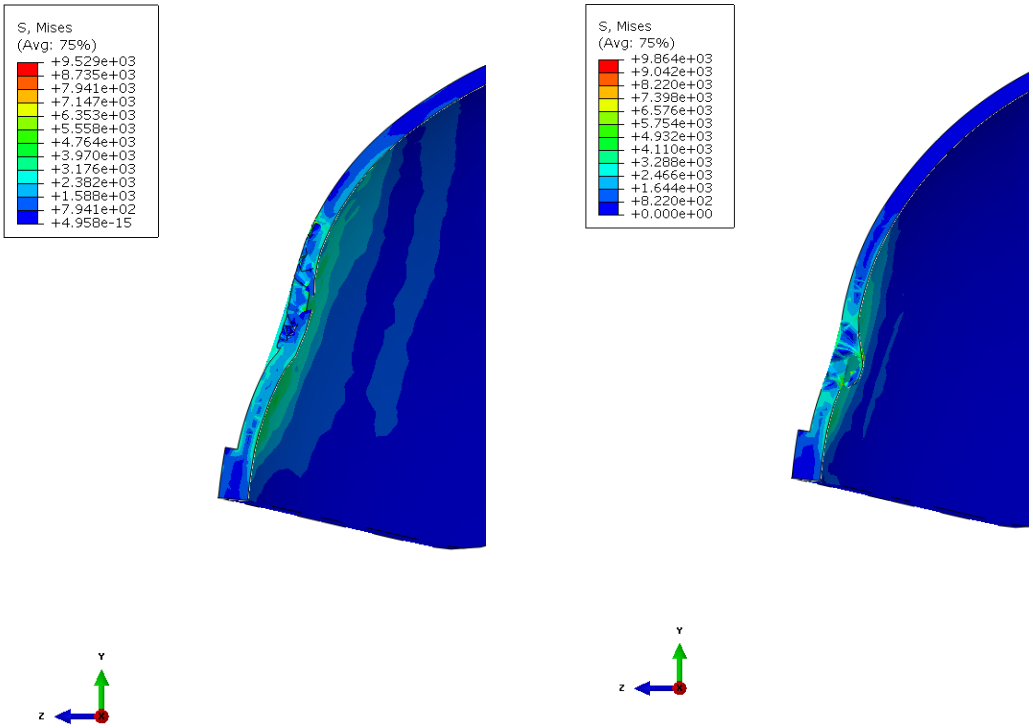
a) b)

Slika 31. Deformacija .308 zrna a) *t* = 0 s, b) *t* = 0,0015 s



Slika 32. Prikaz udara u položaju 1.

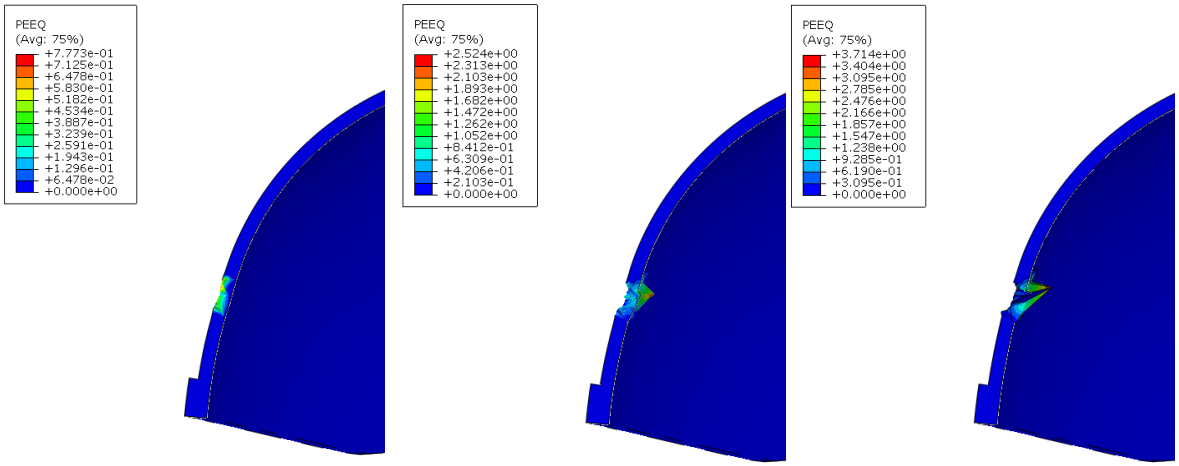
Na slici 33. a) i b) prikazana su naprezanja prilikom udara zrna za položaj 2. odnosno za položaj 3. u trenutku probijanja zrna kroz kacigu.



a) b)

Slika 33. Naprezanje u a) položaj 2. , b) položaj 3. (*t* = 0,0015 s)

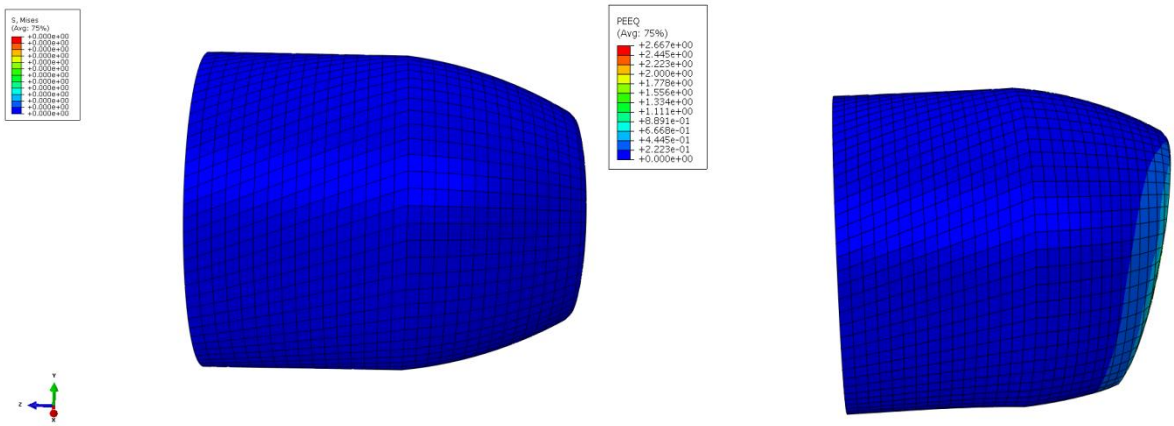
Na slici 34. prikazano je širenje plastične zone prilikom udara zrna iz položaja 4.



Slika 34. Plastična zona za položaj 4.

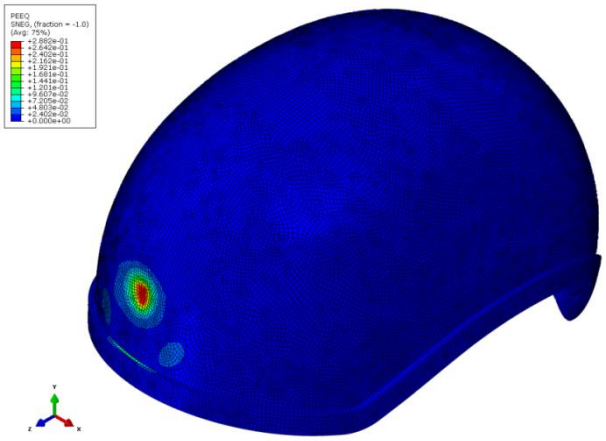
8.2.2.1. 45. ACP

Druga vrsta zrna, .45 ACP, ima znatno manju izlaznu brzinu koja iznosi 340 m/s, što spada u područje malih izlaznih brzina koje ne uzrokuju lom zaštitne opreme, u ovome slučaju kaciga, već ih samo plastično deformiraju. Za ovaj primjer vrijeme analize iznosi 0,0025 sekundi jer je brzina metka gotovo triput manja. Na slici 35. za položaj 1. prikazana je deformacija zrna prije udara i nakon udara u kacigu te je vidljivo da se događa znatno sabijanje vrha zrna. Na slikama 36. do 39. vidljivo je da u analizi s ovom vrstom zrna ne dolazi do loma materijala kacige, već se zrno odbija od kacige.

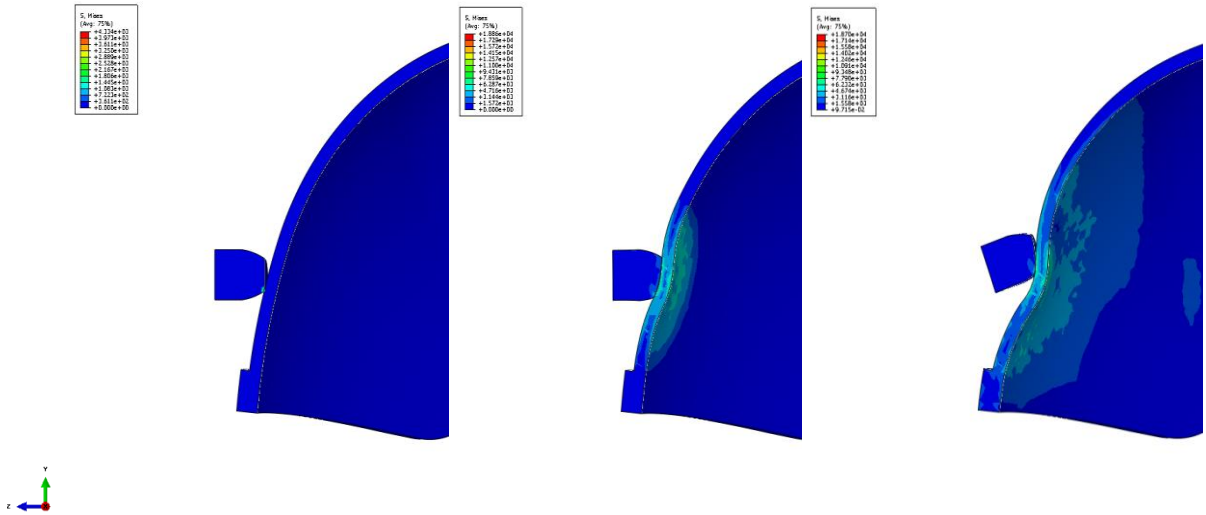


Slika 35. Izgled zrna: a) prije udara, b) nakon udara

Slika 36. prikazuje plastičnu zonu razvijenu nakon udara zrna, dok slika 37. prikazuje deformiranje i naprezanje prilikom udara zrna.

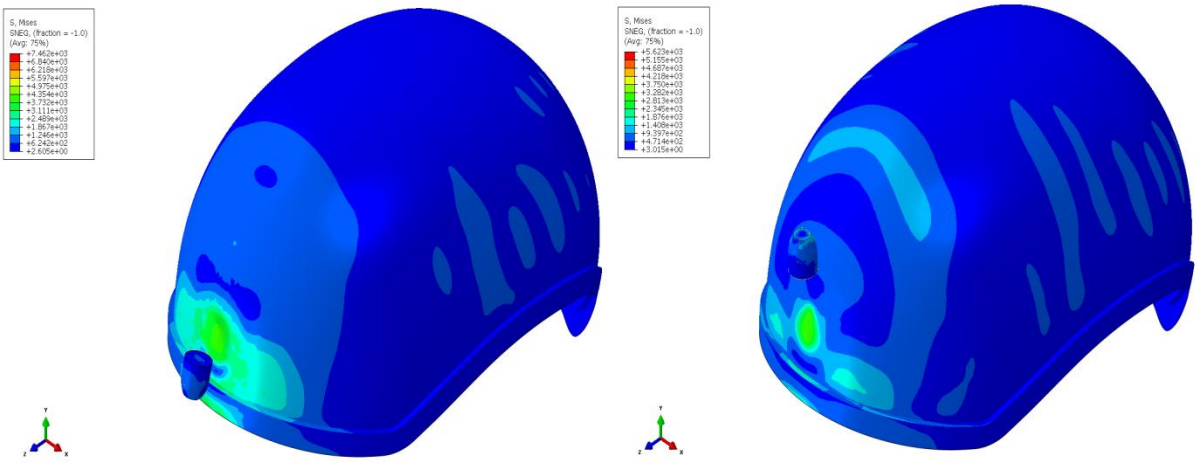


Slika 36. Plastična deformacija za položaj 1. (*t* = 0.0025 s)



Slika 37. Udar .45 ACP zrna tijekom vremena

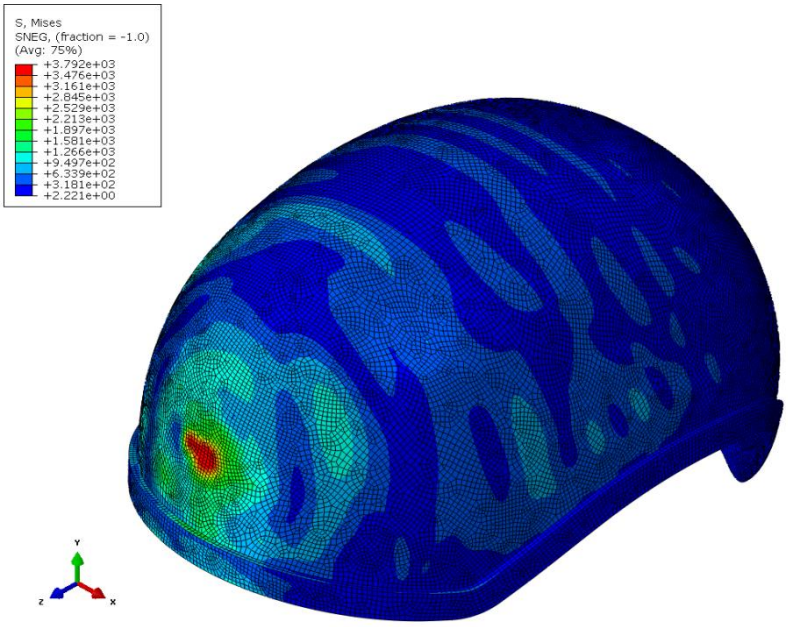
Slike 38. a) i b) prikazuju odbijanje zrna od kacige prilikom udara zrna iz položaja 2. odnosno 3. te nastavak njihove putanje tangencijalno na površinu udara.



a) b)

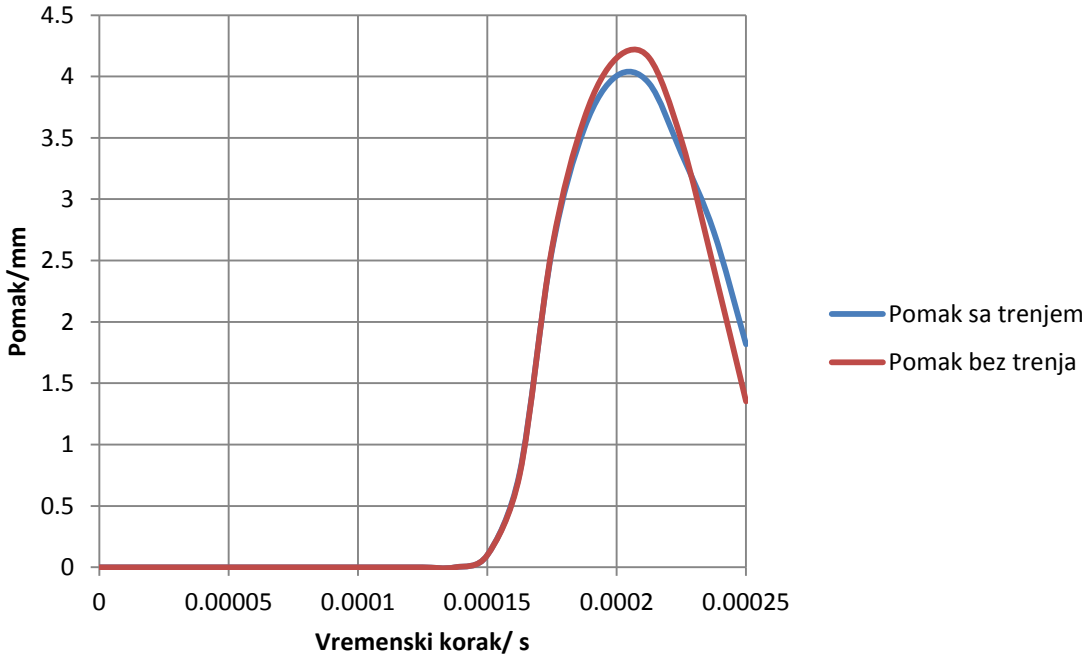
Slika 38. Udar zrna a) položaj 2., b) položaj 3. za *t* = 0,0025 s

Nadalje, na slici 39. prikazana su naprezanja za položaj 4. uslijed udara zrna te se može ustvrditi da niti u jednome slučaju ne dolazi do loma materijala kacige izrađene od E72 vrste čelika prilikom udara .45 ACP zrna već su se samo stvorile plastične zone oko mjesta udara zrna.



Slika 39. Udar zrna za položaj 4. (*t* = 0.0025 s)

U svrhu testiranja provela se analiza s tangencijalnim dodirom za položaj 4. te se uzelo u obzir trenje koje iznosi 0,1. Na slici 40. prikazani su pomaci čvora na mjestu udara za dvije provedene analize, odnosno za analizu s normalnim kontaktom bez trenja te za analizu s tangencijalnim kontaktom i trenjem.

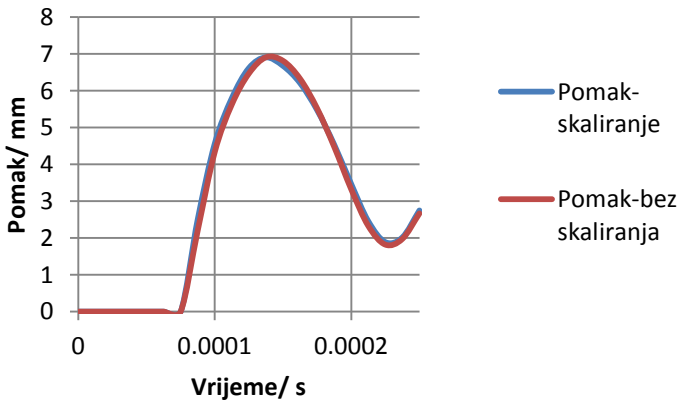


Slika 40. Dijagram usporedbe pomaka zrna za položaj 4.

Provela se i analiza položaja 4. pomoću skaliranja masene matrice. Na slici 41. prikazan je stražnji dio kacige čija je mreža dodatno usitnjena, kako bi se Courantov broj računao prema stražnjim elementima čija se masena matrica skalirala s faktorom 5. Stražnji dio kacige odabran je zato što ne utječe bitno na rezultate udara jer, kada se odabere prednji dio kacige, dolazi do prekida analize upravo zbog prevelikog Courantovog broja.

Slika 41. Dodatno usitnjena mreža konačnih elemenata

Dijagram na slici 42. sadrži usporedbu pomaka čvora u zoni udara zrna te je vidljivo da rezultati neznatno odstupaju jedan od drugoga, no problem je u tome što se računalno vrijeme nije znatno uštedilo. Točnije, kada se analizira bez skaliranja matrice vrijeme trajanja analize iznosi 3295 sekundi, a kada se skalira matrica s faktorom 5 vrijeme iznosi 3096 sekundi. Također je provedena analiza s većim faktorima skaliranja, ali vrijeme analize nije se smanjivalo. Neefikasnost skaliranja mase učestali je problem u analizama kod kojih kinetička energija čini velik dio ukupne energije promatranog sustava [3], što je slučaj i kod ovoga problema.

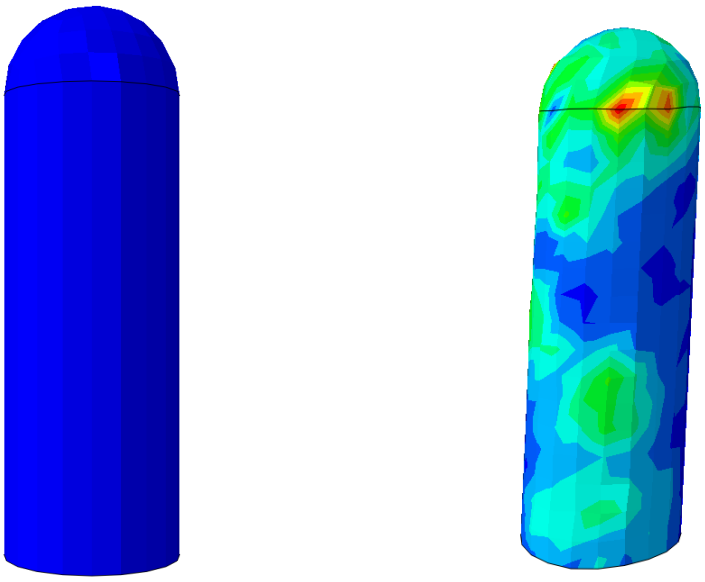


Slika 42. Usporedba pomaka

8.2.2. Čelik Weldox 460E

8.2.2.1. Winchester .308

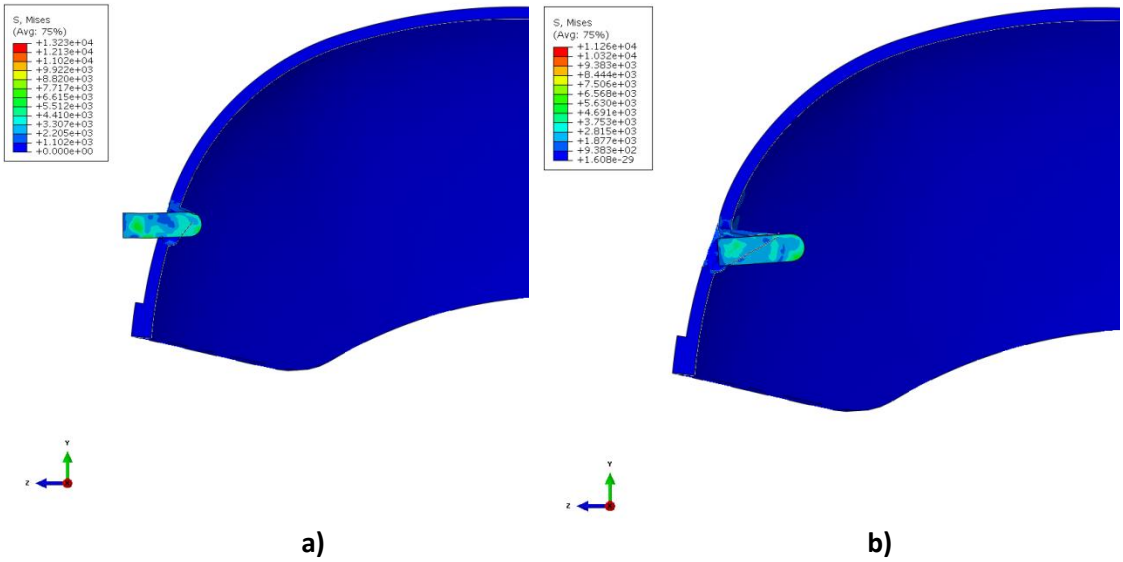
Kao drugi materijal korišten je čelik Weldox 460E koji se koristio i za usporedbu vrsta konačnih elemenata. Kao i u prethodnome primjeru materijal je testiran u četiri različita položaja. Simualcije su se provodile i Na slici 43. prikazana je deformacija zrna polusfernog oblika. Vidljivo je da se ovakav oblik ne deformira nakon udara, stoga radi manje štete i potencijalno je manje opasan [13]. Primarna razlika u odnosu na čelik E72 može se vidjeti na slici 44. prilikom udara za položaj 1.



a) b)

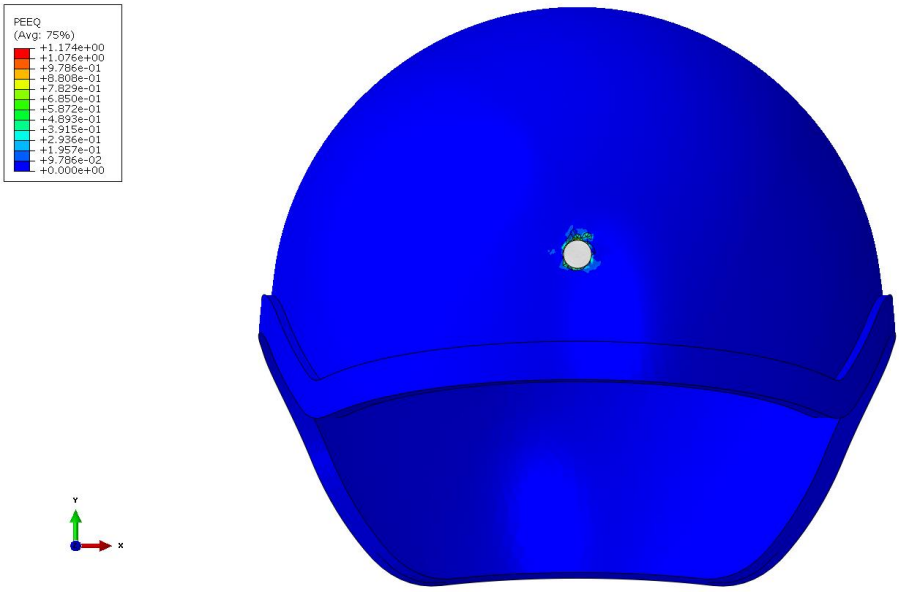
Slika 43. Polsuferno zrno a) *t* = 0 s, b) *t* = 0,0015 s

Slika 44. prikazuje ulaz zrna u kacigu tijekom analize te je sa slike vidljivo da zrno prilikom probijanja rotira i nastavlja putanju pod kutom što je rezultat i samog zakrivljenja kacige. Vidljivo je da je otpor materijala znatno manji te da pri istim uvjetima metak znatno lakše propagira kroz materijal.



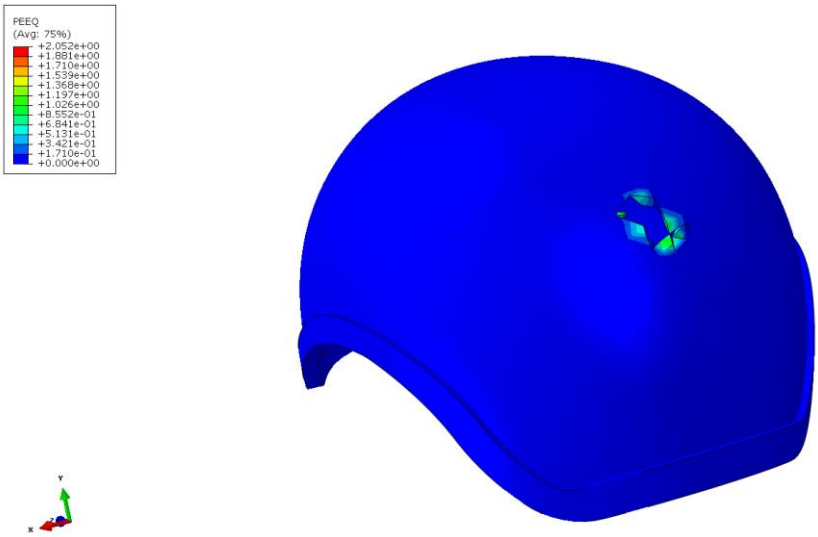
Slika 44. Probijanje polusfernog zrna: a) *t* = 0,0005 s, b) *t* = 0,0006 s

Na slici 45. prikazano je širenje plastične zone nakon udara polusfernog zrna u kacigu te je vidljivo da je oblik rupe nakon udara identičan obliku zrna što se može pripisati velikoj brzini udara i obliku zrna.



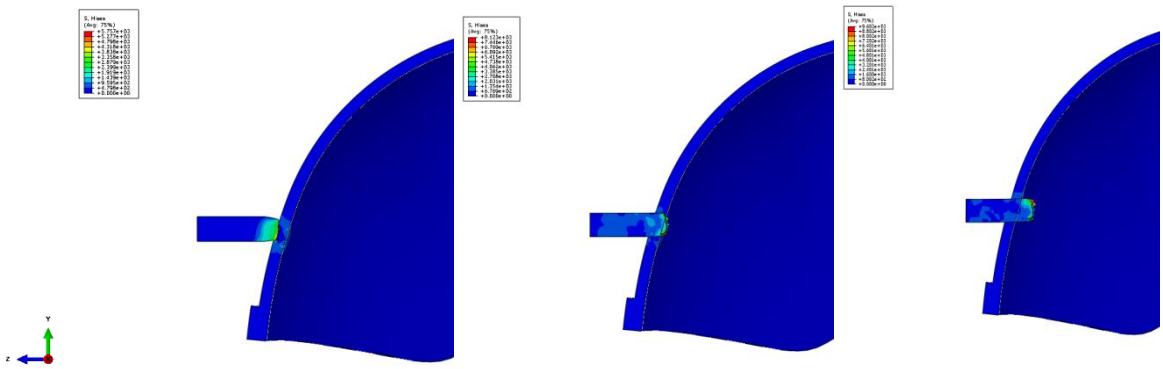
Slika 45. Plastična zona – položaj 1. (*t* = 0,0015 s)

S obzirom da zrno rotira uslijed probijanja poželjno je pogledati i stražnji izlaz kacige, prikazan na slici 43.



Slika 46. Plastična zona za položaj 1., stražnji dio kacige (*t* = 0,003 s)

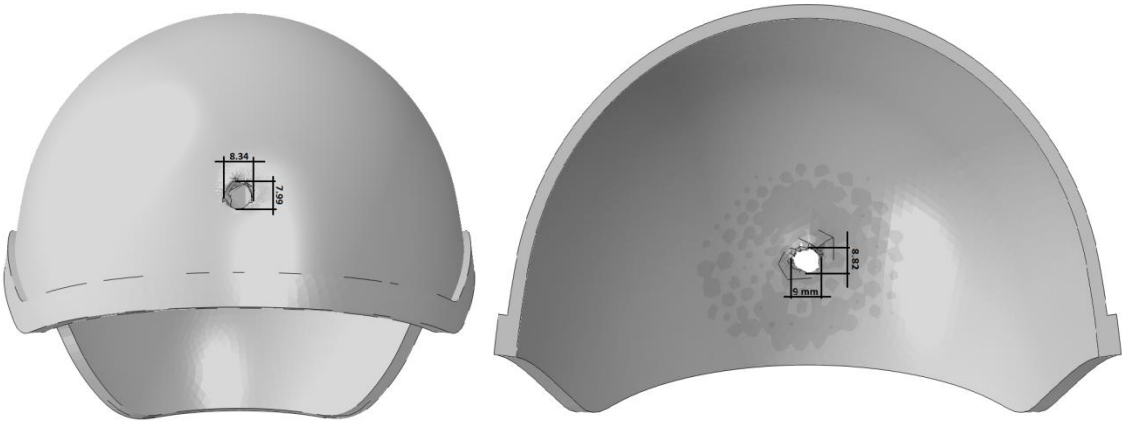
Vidljivo je da on nije na istome pravcu kao i ulazna rupa te je znatno nepravilnijeg oblika jer zrno više ne udara okomito na površinu, već pod kutom, pa tako i zrno djelomice probija kacigu bočnom površinom. Za razliku od polusfernog zrna konusno zrno znatnije se deformira te samim time radi veću štetu prilikom ulaska u kacigu. Na slici 47. prikazano je probijanje konusnog zrna, dok se sami izgled zrna neće dodatno prikazati jer se deformira slično kao i na slici 43.



Slika 47. Plastična zona za položaj 1., konusni završetak

Slika 48. prikazuje usporedbu dimenzija rupe nastale nakon a) polsufernog zrna i b) konusnog zrna. Vidljivo je da polusferno zrno uzrokuje rupu približno kružnog oblika (8 mm x 8 mm),

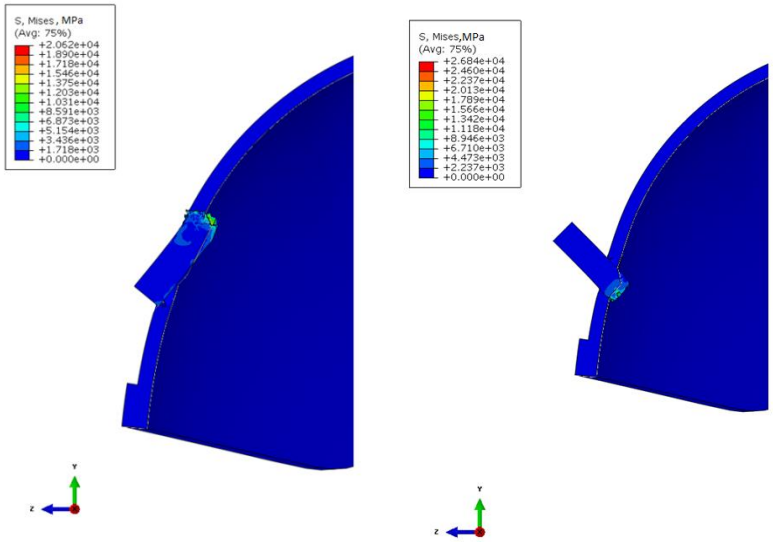
dok konusno na prednjoj plohi daje iste dimenzije, ali na stražnjoj zbog širenja povećava rupu (9 mm x 9 mm).



a) b)

Slika 48. Rupa nastala prilikom sudara kacige i: a) polusfernog, b) konusnog zrna

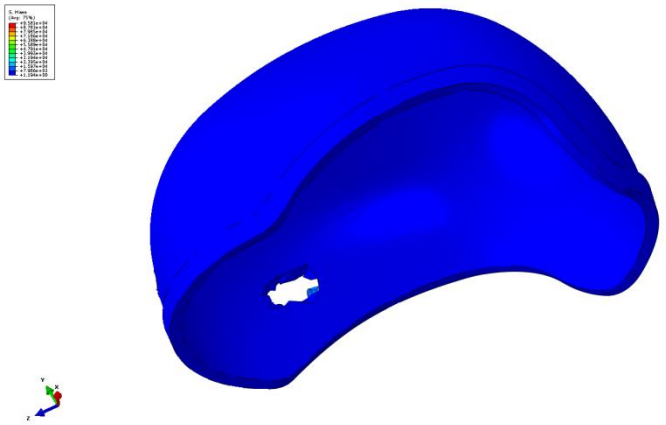
Nadalje, za položaj 2. metak više ne tangira kacigu i bočnim dijelom je oštećuje, već prolazi kroz nju, što je vidljivo na slici 50.a), dok je na slici 50. b) prikazano probijanje kacige iz položaja 3.



a) **b)**

Slika 49. Naprezanje kacige uslijed a) položaja 2., b) položaja 3.

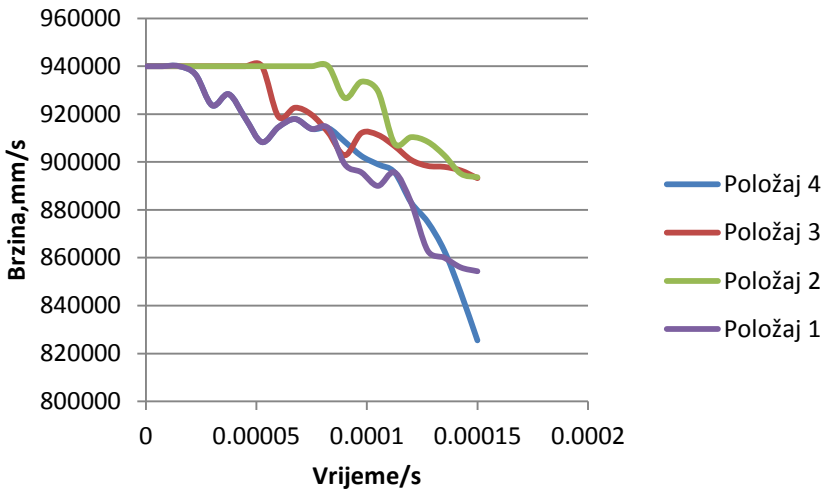
Slika 50. prikazuje izlaznu rupu za položaj 4. koja je znatno veća od ulazne.



b) **b)**

Slika 50. Izlazna rupa za položaj 4. (*t* = 0,0015 s) 3.

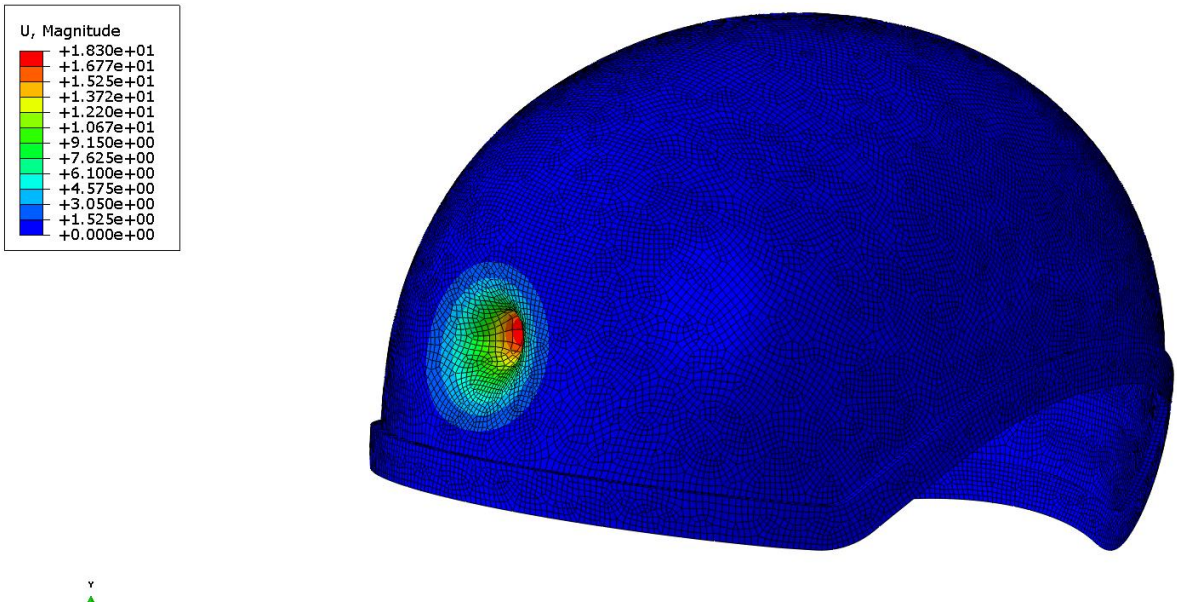
Naposljetku, može se prikazati dijagram izlaznih brzina zrna nakon udara, gdje položaj 4. oduzima najviše kinetičke energije pa samim time i najviše smanjuje brzinu, jer u istome vremenskome periodu dvaput probija kacigu, dok položaj 2. i 3. najmanje smanjuju brzinu.



Slika 51. Dijagram izlaznih brzina

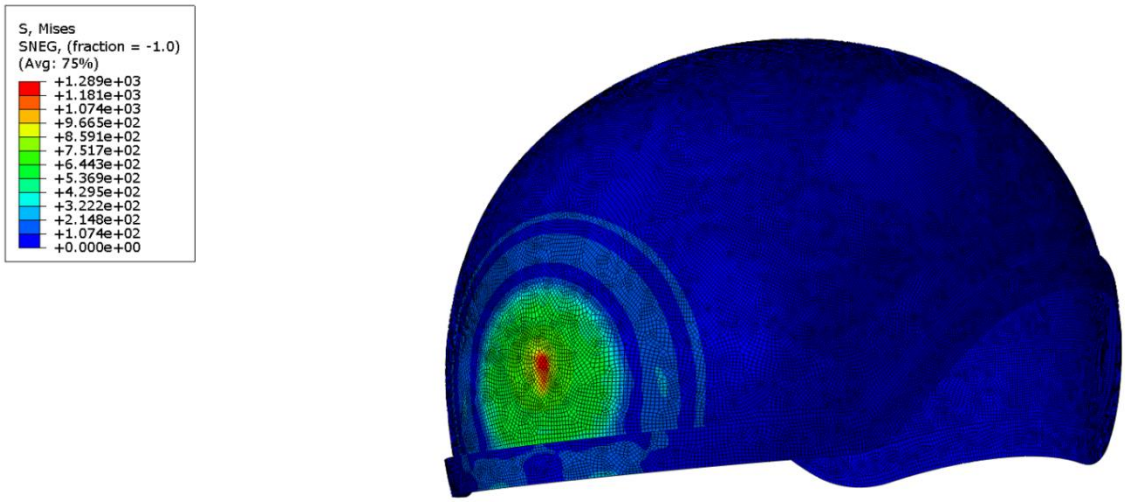
8.2.2.2. .45 ACP

Čelik Weldox testirao se i s drugom vrstom metka pa je na slici 52. prikazan rezultat pomaka za položaja 1. te se odabrao prikaz pomaka kacige.



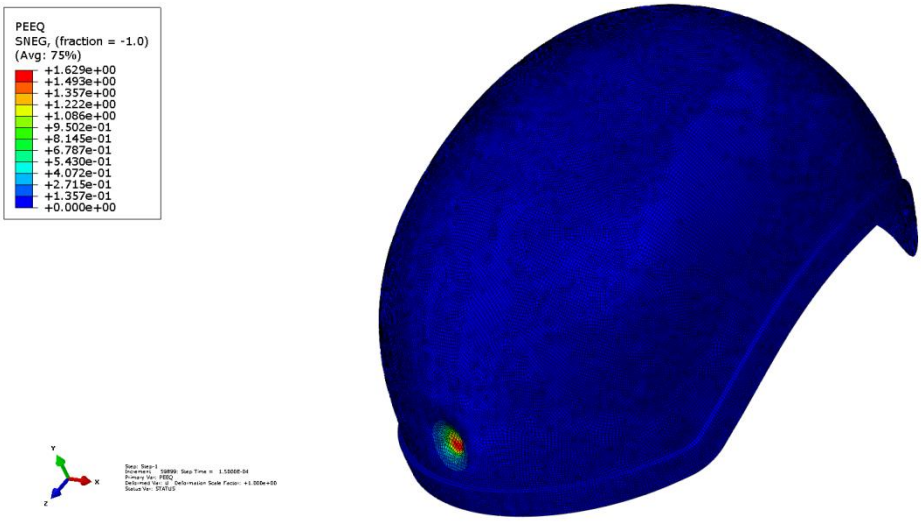
Slika 52. Pomak kacige za položaj 1.

Sa slike 53. vidljivo je da materijal nije popustio, ali se dogodila velika deformacija kacige, koja je sama po sebi potencijalno smrtonosna za vojnika koji ju nosi.



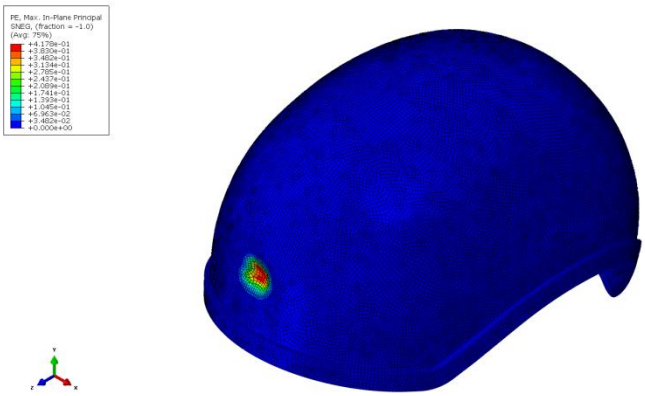
Slika 53. Naprezanje kacige za položaj 2.

Slika 54. prikazuje plastičnu zonu u trenutku 0,0025 sekundi gdje se jasno vidi da je zrno potrošilo kinetičku energiju samo na plastifikaciju ali nije došlo do inicijacije pukotine i loma.



Slika 54. Plastična zona za položaj 3.

Kod položaja 4. na slici 55. prikazana je deformacija kacige te se, kao i u slučaju čelika E72 za isto zrno, ne događa probijanje, već zrno nastavlja tangencijalnu putanju uz kacigu.



Slika 55. Naprezanje za položaj 4.

9. ZAKLJUČAK

Analizu balističke zaštite moguće je numeričkim putem relativno uspješno riješiti. Softverski paket Abaqus daje mnoge načine rješavanja ovakvih problema, od mogućnosti korištenja više vrsta konačnih elemenata pa do raznih tehnika poput automatskog i fiksnog inkrementiranja, masenog skaliranja te vremenskog skaliranja. Problem se javlja kod kompleksnijih geometrija, poput razmatrane geometrije kacige, kod kojih je teško diskretizirati geometriju s kvalitetnom mrežom te pritom imati relativno kratku vremensku analizu koja je i stabilna. U ovom radu prvotno su se prikazala odstupanja numeričkog rješenja od jednostavnog analitičkog primjera udara mase u gredu te se dokazalo da je moguće riješiti problem dinamike numeričkim putem uz mala odstupanja. Validacija konačnih elemenata izvršila se na jednostavnom primjeru ploče gdje su se podaci preuzeli iz eksperimentalnih istraživanja kako bi se odredio optimalan broj konačnih elemenata uz najkraće vrijeme. Ustvrdilo se da heksaedarski i ljuskasti elementi daju identične rezultate uz korištenje relativno malog broja konačnih elemenata. Suprotno tome, tetraedraski konačni elementi se pokalapaju s heksaedarskim i ljuskastim konačnim elementima tek kada se ploča diskretizira s velikim brojem konačnih elemenata. Zadnje poglavlje prikazuje ponašanje kacige uslijed udara zrna iz četiri položaja te koristeći dvije vrste materijala. Korišteni elementi su ljuskasti konačni elementi, S4R, jer su se validacijom ustvrdili kao najoptimalniji, dok heksaedarskim konačnim elementima nije moguće diskretizirati izrazito zakrivljenu geometriju. Slika 30. prikazuje ponašanje kacige uslijed udara polusfernog Winchester .308 zrna u položaju 1. te je vidljivo da takvo zrno uzrokuje relativno malu rupu na kacigi. Na slici 31. prikazana je deformacija konusnog zrna te je vidljiva znatna deformacija takvog oblika zrna čemu je uzrok sami oblik zrna ali i zakrivljenost površine kacige. Upravo zbog takve deformacije, konusno zrno prilikom ulaska u tkivo uzorkuje smrtonosne posljedice te nije prihvaćeno u NATO standardima [15]. Položaj 2. i 3. znatno su pogodniji sa strane zaštite jer zrno troši više kinetičke energije za probijanje stoga su i veće šanse da ne probije kacigu. Druga vrsta zrna, .45 ACP ne probija čelik E72 u nijednome položaju već troši energiju na plastificiranje kacige, slika 37. Za položaj 4. provedena je analiza sa tangencijalnim kontaktom i trenjem te su razlike između analiza sa trenjem i bez trenja pokazane u dijagramu na slici 41. U svrhu smanjenja trajanja simulacije provedena je tehnika masenog skaliranja koja prema dijagramu sa slike 42. pokazuje da ne pomaže kod problema gdje prevladava kinetička energija u

sustavu. Također, prikazano je ponašanje dvaju različitih oblika zrna te su se potvrdila njihova otprije poznata ponašanja. Druga vrsta čelika, Weldox 460, analizirana je na identične načine. Deformacija polusfernog Winchester .308 zrna prikazana je na slici 43. te je vidljivo da deformacija nakon propagacije kroz materijal nije značajna. Samim time može se zaključiti da ovakva vrsta završetak zrna ostavlja manje tragove nakon probijanja te je tako potencijalno manje smrtonosna. Zrno .45 ACP nije penetriralo ni kroz ovu vrstu čelika nego je samo plastificiralo kacigu.

Daljnji razvoj simulacija moguć je progušćivanjem mreže konačnih elemenata, korištenje bezmrežne metode prema SPH teoriji te usporediti takav pristup sa rezultatima dobivenima u ovome radu.

LITERATURA

[1] Kraut, B.: Strojarski priručnik, Tehnička knjiga Zagreb, 1970.

[2] Decker, K. H.: Elementi strojeva, Tehnička knjiga Zagreb, 1975.

[3] Dassault System, *Abaqus 6.13. Documentation*

[4] Ls-Dyna Manual

[5] Siemens Femap Manual.

[6] http://www.grabcad.com [Pristup 21. 8. 2017]

[7] www.caei.com/explicit-dynamics

[8] T. Børvik: Ballistic penetration and perforation of steel plates, NTNU, Trondheim, 2000

[9] C. Lakshmana Rao, V. Narayanamurthy, K. R.Y. Simha: Applied Impact Mechanics, 2016.

[10] Z. Tonković: Dinamička analiza - prezentacija sa predavanja iz NAK-a, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.

[11] M. Husnjak: Mehanika loma - bilješke s predavanja, Zagreb, 2009.

[12] Winchester Components Catalog, Winchester Ammunition, East Alton, Illinois, 1999.

[13] Colt Commercial Catalog, Colt Manufacturing Company LLC, 2016.

[14] http://www.dupont.com [Pristup 1. 11. 2017.]

[15] Martin R. Mason, Platform Firearms and Calibers, Austin, 2015.

PRILOZI

```
*Heading
*Node
*Element, type=C3D8R
*Nset, nset=ASSEMBLY_METAK-1_SET-1
*Elset, elset=ASSEMBLY_METAK-1_SET-1
*Node
*Element, type=S4R
*Nset, nset=ASSEMBLY_PART-3-1_SET-1
*Elset, elset=ASSEMBLY_PART-3-1_SET-1
*Nset, nset=ASSEMBLY_SET-2
*Nset, nset=ASSEMBLY_SET-3
*Elset, elset=ASSEMBLY_SET-2
*Elset, elset=ASSEMBLY_SET-3
*material, name=CELIK
*damageinitiation, criterion=JOHNSONCOOK
*damageevolution, type=DISPLACEMENT
*density
*elastic
*plastic, hardening=JOHNSONCOOK
*ratedependent, type=JOHNSONCOOK
*material, name=METAK
*density
*elastic
*surfaceinteraction, name=KONTAKT
*friction
*solidsection, elset=ASSEMBLY_METAK-1_SET-1, material=METAK
*shellsection, elset=ASSEMBLY_PART-3-1_SET-1, material=CELIK, controls=EC-1
*sectioncontrols, name=EC-1, elementdeletion=YES, maxdegradation=0.2
*solidsection, elset=ASSEMBLY_METAK-1_SET-1, material=METAK
*solidsection, elset=ASSEMBLY_METAK-1_SET-1, material=METAK
```

```
 *shellsection, elset=ASSEMBLY_PART-3-1_SET-1, material=CELIK, controls=EC-1
 *initialconditions, type=VELOCITY
 *friction
 *initialconditions, type=VELOCITY
 *output, field, variable=PRESELECT
 *output, history, variable=PRESELECT
 *Step, name=Step-1, nlgeom=YES
 *Step, name=Step-1, nlgeom=YES
 *dynamic, explicit, elementbyelement
 *output, field, variable=PRESELECT
 *output, history, variable=PRESELECT
 *endstep
 *surfaceinteraction, name=KONTAKT
 *friction
 *boundary
 *contact, op=NEW

***WARNING: OP=NEW on *CONTACT is ignored when the general contact definition
          is specified as model data.
 *contactinclusions, allexterior
 *contactpropertyassignment
*contact controls assignment, Contact Thickness Reduction=NOPERIMSELF
 *Step, name=Step-1, nlgeom=YES
 *dynamic, explicit, elementbyelement
 *endstep
```