Numerička analiza udara projektila u izotropnu višeslojnu ploču

Lukač, Filip

Master's thesis / Diplomski rad

2015

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:726471

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

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







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Filip Lukač

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Ivica Smojver, dipl. ing.

Student:

Filip Lukač

Zagreb, 2015.

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

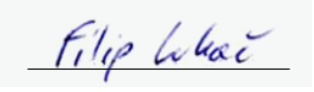
Zahvaljujem se mentoru prof.dr.sc. Ivici Smojveru na kvalitetnom vođenju i savjetima tijekom cjelokupnog procesa izrade diplomskog rada. Asistentu dr.sc. Darku Ivančeviću zahvaljujem na savjetima pri izvođenju simulacija i strpljenju. Također se zahvaljujem na ustupljenom računalu koje je gotovo udvostručilo učinkovitost izvođenja simulacija.

Tvrtki Đuro Đaković Holding d.o.o. zahvaljujem na stipendiji, a mr.sc. Borislavu Peciću na motivaciji za ovu temu i pomoći u početnim fazama izrade rada.

Svim kolegama, asistentima i profesorima koji su mi na bilo koji način pomogli tijekom studija srdačno zahvaljujem.

Na kraju, obitelji i prijateljima zahvaljujem na strpljenju, pomoći i podršci tijekom studiranja te izrade ovog diplomskog rada.

Filip Lukač



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: **Filip Lukač** Mat. br.:0035177665

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Numerička analiza udara projektila u izotropnu višeslojnu ploču**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Numerical Analysis of Projectile Impact at Isotropic Layered Plate**

Opis zadatka:

Izvršiti numeričku analizu udara projektila odgovarajuće brzine koja odgovara balističkim parametrima razmatrane konstrukcije u svrhu određivanja granične (probojne) brzine. U radu varirati debljinu mete kao i početnu brzinu projektila. Geometriju projektila držati konstantnom, te ga modelirati kao izotropan i deformabilan. U sljedećoj fazi rada, potrebno je varirati kut udara projektila te temeljem toga donijeti zaključke o balističkim sposobnostima mete pri realnim slučajevima udara koji odgovaraju oklopnoj zaštiti vozila. Pri modeliranju postaviti odgovarajuće početne i rubne uvjete, definirati trenje između projektila i mete, kao i kontaktne površine za numeričko modeliranje složenog kontakta koji se javlja kod višeslojnih materijala. Materijal mete modelirati kao elasto-plastičan uz razmatranje mehaničkih svojstava materijala kod velikih brzina deformiranja, a koje odgovaraju udaru projektila velikom brzinom. Temeljem iskustva u radu procijeniti mogućnosti različitih metoda u rješavanju ovih problema.

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

U radu navesti korištenu literaturu te eventualnu dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:	Rok predaje rada:	Predviđeni datumi obrane:
12. ožujka 2015.	14. svibnja 2015.	20., 21. i 22. svibnja 2015.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Ivica Smojver

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ I
POPIS SLIKA II
POPIS TABLICA V
POPIS OZNAKA VI
SAŽETAK IX
SUMMARY X
1. UVOD 1
1.1. Metoda numeričke integracije 7
2. NUMERIČKE SIMULACIJE – OPIS I VALIDACIJA MATERIJALNOG MODELA . 11
2.1. Materijalni model 12
2.1.1. Materijalni model ploče 12
2.1.2. Materijalni modeli korišteni u simulacijama 15
2.2. Validacija materijalnog modela 17
2.2.1. Numerički model ploče 18
2.2.2. Rubni uvjeti 19
2.2.3. Opterećenje 19
2.2.4. Mreža konačnih elemenata 20
2.2.5. Trenje 24
2.2.6. Kontakt 24
2.2.7. Parametri materijala 25
2.2.8. Validacija materijalnog modela ploče 25
3. NUMERIČKE SIMULACIJE – ODREĐIVANJE UTJECAJA NA PROBIJANJE 36
3.1. Utjecaj kuta udara 36
3.2. Utjecaj vrha projektila 40
3.3. Utjecaj konfiguracije ploča 44
ZAKLJUČAK 49
LITERATURA 51
PRILOZI 53

POPIS SLIKA

Slika 1. Zakošenost oklopa kupole Merkave IV [1] 1
Slika 2. *Standoff* oklop na Leopardu 2 [2] 2
Slika 3. Načini popuštanja pri perforaciji projektila u metu [3], [5] 4
Slika 4. Formiranje čepa pri udaru (engl. plugging) [6] 5
Slika 5. Krhki način popuštanja (a) i način popuštanja sa radijalnim širenjem pukotine (b) [5] 6
Slika 6. Definicija vremenskih trenutaka pri metodi središnjih razlika 8
Slika 7. Bilinearna karakteristika materijala projektila [4] 17
Slika 8. Eksperimentalni postav za ispitivanje probijanja [18] 18
Slika 9. Numerički model ploče i projektila 18
Slika 10. Geometrije projektila [4] 19
Slika 11. Rubni uvjeti 19
Slika 12. Polje početne brzine projektila 20
Slika 13. Mreža konačnih elemenata projektila s ravnim vrhom 21
Slika 14. Mreža konačnih elemenata projektila sa koničnim vrhom 22
Slika 15. Mreža konačnih elemenata ploče 23
Slika 16. Područje elemenata koji nisu distordirani 24
Slika 17. Naprezanja tijekom probijanja ploče debljine 20 mm elastično deformabilnim projektilom početne brzine 338 m/s 27
Slika 18. Brzina točke na projektilu tijekom udara elastično deformabilnog projektila s početnom brzinom 338 m/s u ploču debljine 20 mm 27
Slika 19. Prolazak početnog vala naprezanja kroz elastični projektil (u metu udara desno) 28
Slika 20. Početni val brzine u smjeru osi *Z* kroz elastični projektil (u metu udara desno) .. 28
Slika 21. Usporedba balističkih krivulja za simulacije s elastičnim projektilom 29
Slika 22. Utjecaj promijenjenih parametara na balističku krivulju 30
Slika 23. a) - elastično deformabilan projektil ; b) - plastično deformabilan projektil (vrh projektila u kontaktu sa pločom je desno) 30
Slika 24. Proširivanje rupe u ploči debljine 20 mm - plastično nedeformabilan (a) i plastično deformabilan (b) projektil sa ulaznom brzinom od 338 m/s 31

Slika 25. Naprezanja tijekom probijanja ploče debljine 20 mm plastično deformabilnim projektilom početne brzine 338 m/s 32
Slika 26. Brzina točke na projektilu tijekom udara plastično deformabilnog projektila s početnom brzinom 338 m/s u ploču debljine 20 mm 32
Slika 27. Usporedba balističkih krivulja za simulacije sa plastično deformabilnim projektilom 33
Slika 28. Usporedba svih balističkih krivulja 33
Slika 29. Ovisnost granične brzine probijanja o debljini ploče 34
Slika 30. Kriteriji probijanja [5] 35
Slika 31. Udar pod kutem – kut udara i koordinatni sustav 36
Slika 32. Usporedba balističkih krivulja za različite kuteve udara 37
Slika 33. Efektivna debljina probijanja 37
Slika 34. Naprezanje pri „skretanju“ projektila pri probijanju s ulaznom brzinom 330 m/s pod kutem od 20° 38
Slika 35. Smjer formiranja čepa kod udara pod kutem 39
Slika 36. Naprezanje prilikom probijanja koničnog projektila s početnom brzinom 300 m/s u ploču debljine 16 mm 41
Slika 37. Usporedba balističkih krivulja za različite oblike vrha projektila 42
Slika 38. Raspadnuti projektil s ravnim vrhom nakon udara u ploču debljine 30 mm [4] ... 42
Slika 39. Mjesto probijanja stražnje površine kod probijanja ploče debljine 16 mm od strane koničnog pojektila sa ulaznom brzinom od 300 m/s 43
Slika 40. Proširivanje rupe kod probijanja koničnog projektila brzinom od 300 m/s u ploču debljine 16 mm 43
Slika 41. Naprezanje pri „zatupljivanju“ vrha koničnog projektila s ulaznom brzinom od 300 m/s (za skalu boja – vidi sliku 40) 44
Slika 42. Konfiguracije ploča – a) homogena; b) višeslojna bez razmaka; c) višeslojna sa razmakom od 6mm 44
Slika 43. Brzine projektila tijekom udara u konfiguracije meta koničnim projektilom ulazne brzine 550 m/s 45
Slika 44. Naprezanja prilikom probijanja homogene ploče debljine 24 mm koničnim projektilom s ulaznom brzinom 550 m/s 46
Slika 45. Naprezanja prilikom probijanja višeslojne ploče bez razmaka koničnim projektilom s ulaznom brzinom 550 m/s 47

Slika 46. Naprezanja prilikom probijanja višeslojne ploče s razmakom koničnim projektilom s ulaznom brzinom 550 m/s 48

POPIS TABLICA

Tablica 1. Broj elemenata i čvorova mreža konačnih elemenata 21
Tablica 2. Parametri za Weldox 460 E [4] 25
Tablica 3. Parametri za Arne tool steel [4] 25
Tablica 4. Rezultati simulacija sa variranjem kuta udara 39
Tablica 5. Prosječne izlazne brzine koničnog projektila za tri konfiguracije meta 46

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	N/mm^2	Konvencionalna granica tečenja
A_0	m^2	Početna površina proizvoljnog presjeka tijela
A_p	m^2	Površina koju zauzimaju pukotine i šupljine na proizvoljnom presjeku tijela
B	N/mm^2	Parametar koji opisuje utjecaj očvršćivanja materijala
$\mathbf{C}$	N·s/m	Matrica prigušenja
c_d	m/s	Brzina širenja dilatacijskog vala u materijalu
c_p	J/K	Specifična toplina
C_1	-	Konstanta brzine deformacije za Johnson-Cook model
C_2	-	Konstanta brzine deformacije za modificirani Johnson-Cook model
D	-	Parametar oštećenja u materijalu
D_c	-	Parametar loma
D_{1-5}	-	Parametri Johnson-Cook modela za određivanje ekvivalentne plastične deformacije pri lomu
$\mathrm{d}\boldsymbol{\varepsilon}$	m/m	Inkrementalna promjena vektora deformacije
E	N/mm^2	Modul elastičnosti
$\mathbf{F^i}$	N	Vektor unutarnjih sila
$\mathbf{F}^\mathbf{i}_{t+\Delta t}$	N	Vektor unutarnjih sila u trenutku $t+\Delta t$
$\mathbf{F^r}$	N	Vektor rezidualnih sila
F_i^r	N	Rezidualna sila pridružena *i*-tom stupnju slobode gibanja
$\mathbf{K}$	N/m	Matrica krutosti
L_e	m	Karakteristična duljina elementa
$\mathbf{M}$	kg	Dijagonalna matrica masa
m	-	Parametar koji opisuje mekšanje uslijed promjene temperature
m_i	kg	Masa pridružena *i*-tom stupnju slobode gibanja
n	-	Parametar koji opisuje utjecaj očvršćivanja materijala
$\mathbf{R}(t)$	N	Vektor vanjskog opterećenja

T	K	Temperatura
T_{melt}	K	Temperatura tališta materijala
T_0	K	Sobna temperatura
t	mm	Debljina ploče
t_{ef}	mm	Efektivna debljina ploče
$\mathbf{u}$	m	Vektor pomaka
$\mathbf{u}_t$	m	Vektor pomaka u trenutku *t*
$\mathbf{u}_{t-\Delta t}$	m	Vektor pomaka u trenutku *t*-Δ*t*
$\mathbf{u}_{t+\Delta t}$	m	Vektor pomaka u trenutku *t*+Δ*t*
$\dot{\mathbf{u}}$	m/s	Vektor brzina
$\dot{\mathbf{u}}_t$	m/s	Vektor brzine u trenutku *t*
$\dot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t/2}$	m/s	Vektor brzine u trenutku *t*-Δ*t/2*
$\dot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t/2}$	m/s	Vektor brzine u trenutku *t*+Δ*t/2*
$\dot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t}$	m/s	Vektor brzine u trenutku *t*+Δ*t*
$\ddot{\mathbf{u}}$	m/s^2	Vektor ubrzanja
$\ddot{\mathbf{u}}_t$	m/s^2	Vektor ubrzanja u trenutku *t*
$\ddot{u}_i$	m/s^2	Ubrzanje u smjeru *i*-tog stupnja slobode gibanja
Δt_{stab}	s	Stabilni vremenski inkrement
$\Delta\varepsilon_{\text{pl.ekv}}$	m/m	Inkrementalno povećanje ekvivalentne plastične deformacije
$\varepsilon_{\text{ekv}}^{\text{f}}$	m/m	Ekvivalentna plastična deformacija pri lomu
ε_{pl}	m/m	Plastična deformacija
$\varepsilon_{\text{pl}}^{\text{f}}$	m/m	Plastična deformacija pri inicijaciji oštećenja
$\dot{\varepsilon_{\text{pl}}}$	1/s	Brzina plastične deformacije
$\dot{\varepsilon_0}$	1/s	Referentna brzina plastične deformacije
χ	-	Taylor-Quinney-eva empirijska konstanta
μ	-	Fakor trenja
ν	-	Poissonov faktor
ρ	kg/m^3	Gustoća
σ^*	-	Bezdimenzijski omjer tlačnog naprezanja i ekvivalentnog naprezanja prema Von Misesu
$\bar{\sigma}$	N/mm^2	Ekvivalentno naprezanje prema Teoriji najveće gustoće

		distorzijske energije deformacija
σ_{m}	$\mathrm{N/mm^2}$	Prosječna vrijednost normalnih naprezanja
σ_{T}	$\mathrm{N/mm^2}$	Naprezanje tečenja
$\boldsymbol{\sigma}_t$	$\mathrm{N/m^2}$	Vektor naprezanja u trenutku t
$\boldsymbol{\sigma}_{t+\Delta t}$	$\mathrm{N/m^2}$	Vektor naprezanja u trenutku $t+\Delta t$
$\omega_{\max}$	1/s	Najveća vlastita frekvencija sustava konačnih elemenata

SAŽETAK

U radu se daje kratak uvod u osnovne podjele u području terminalne balistike te se prezentiraju pristupi kojima se rješavaju problemi u ovom području. Nakon toga, u drugom poglavlju je opisana problematika materijalnog modela u literaturi i teškoće s implementacijom materijalnog modela u Abaqus/Explicit. Validacija približnog modela provedena je paralelno sa razvojem simulacija i materijalnog modela te je s početne validacije pojedinačnih slučajeva proširena na validaciju na nizu balističkih krivulja za ploče različitih debljina. Nakon proširivanja materijalnog modela i uključivanja karakteristike plastičnog područja projektila, validacija materijalnog modela ploče je pokazala dovoljno dobro poklapanje sa eksperimentalnim krivuljama. Nakon validacije materijalnog modela, u trećem poglavlju su ispitani utjecaji na probijanje provođenjem niza simulacija. Utjecaj kuta udara projektila ispitan je nizom simulacija za slučajeve različitih kuteva udara projektila s ravnim vrhom u ploču debljine 16 mm. Utjecaj vrha projektila ispitan je nizom simulacija za slučajeve udara projektila s koničnim vrhom u ploču debljine 12 mm. Utjecaj konfiguracije mete ispitan je sa tri simulacije udara koničnog projektila u homogenu ploču i višeslojne konfiguracije mete sa i bez razmaka između ploča.

Ključne riječi: metoda konačnih elemenata, balistički udari, materijalni model, balistička krivulja.

SUMMARY

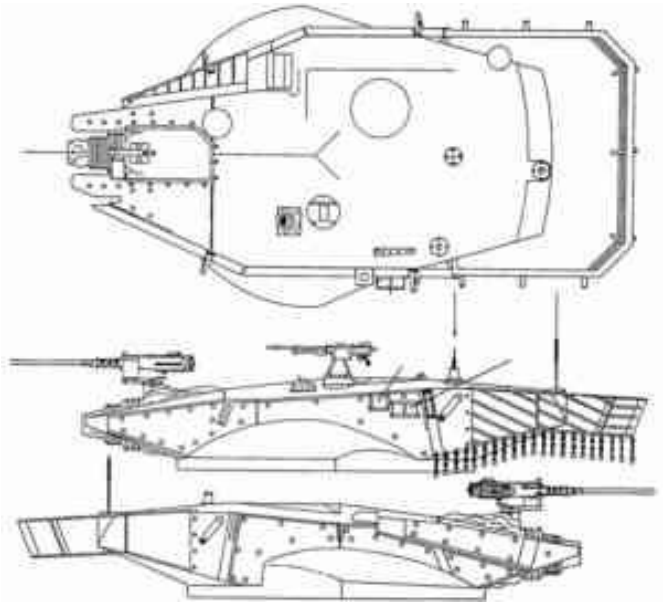
A short introduction into the field of terminal ballistics and its characteristic criteria for classifying ballistic impacts is made. After that, in the second chapter, the material model found in the scientific articles is shown and the difficulties with implementing that material models into Abaqus/Explicit is explained. The process of validation of the approximate material model, as it is developed, is shown – from the validation on the individual impact cases to the validation on the series of ballistic limit curves for several target plate thicknesses. The validation of the material model was found sufficiently good after the adjustment of the projectile material model i.e. the inclusion of the plastic behaviour, was made. In the third chapter, a series of simulations were conducted in order to determine the main influences on the penetration. The influence of the obliquity was determined by a series of simulations where the blunt projectile impacted the 16 mm thick plate under different angles. The influence of the projectile nose shape was determined by a series of simulations where the conical projectile impacted the 12 mm thick plate. The influence of the target configuration was determined by three simulations where the conical projectile impacted the homogenous plate, the layered plate with no clearance between two plates and the layered plate with clearance between two plates.

Key words: finite elements method, ballistic impacts, material model, ballistic limit curve.

1. UVOD

Povijest čovječanstva obilježena je ratovima u kojima je nerijetko vojna tehnika bila odlučujući faktor. Bitan dio vojne tehnike su i tehnike zaštite ljudi, vozila i tereta. Jedan od bitnih načina zaštite je oklopna zaštita vozila, koja je kroz povijest napredovala najviše sa razvojem materijala.

U procesu konstruiranja oklopne zaštite, ali i vojnih oklopnih vozila općenito, potrebno je moći na neki način predvidjeti ponašanje konačne konstrukcije. Pogotovo se to odnosi na predviđanje sposobnosti oklopa da izdrži udar određenog projektila. Ukoliko se može na neki način procjeniti razornost projektila tj. razina izdržljivosti trenutnog oklopa, konstruktorima na raspolaganju stoji nekoliko konstrukcijskih mjera. To vrijedi bilo da se radi o postojećem oklopu koji se poboljšava ili jednoj od verzija oklopa pri konstrukcijskim iteracijama. Pod konstrukcijskim mjerama misli se na variranje parametara poput: oblika i debljine (polu)proizvoda (ploča; lijevanog dijela oklopa) od kojeg je oklop izrađen, vanjskog oblika (zakošenost oklopa u odnosu na horizontalnu ravninu vozila; slika 1 [1]), konfiguracije dijelova oklopa (npr. sendvič konstrukcije oklopa ili tzv. *standoff* oklop sa elementima oklopa udaljenim od glavnog dijela oklopa – slika 2 [2]) ili materijala oklopa koji se koriste, uključujući i njihov raspored u konfiguraciji.



Slika 1. Zakošenost oklopa kupole Merkave IV [1]

Pri predviđanju događaja i posljedica udara projektila u oklop bitno je poznavanje područja balistike. Balistika se dijeli na tri grane: unutarnju, vanjsku i terminalnu balistiku [3]. Unutarnja balistika bavi se interakcijom projektila i cijevi prije izlaska projektila iz cijevi, vanjska balistika bavi se pojavama pri letu projektila do udara u metu, a terminalna balistika bavi se svim aspektima događaja pri udaru projektila u metu [3]. Prema kratkoj definiciji, očito je da je za predviđanje ponašanja oklopa i razine oklopne zaštite najbitnija terminalna balistika.



Slika 2. *Standoff* oklop na Leopardu 2 [2]

U terminalnoj balistici postoji više kriterija prema kojima se karakteriziraju udari projektila. Jedan od kriterija prema kojem se razlikuju udari je brzina projektila koji udara u metu. Podjela po ovakvom kriteriju bitna je zbog toga što je ulazna brzina projektila neposredno prije udara u metu dominantan čimbenik koji utječe na ponašanje mete. Brzina utječe na pojave u materijalu koje dominiraju pri udarima [4]:

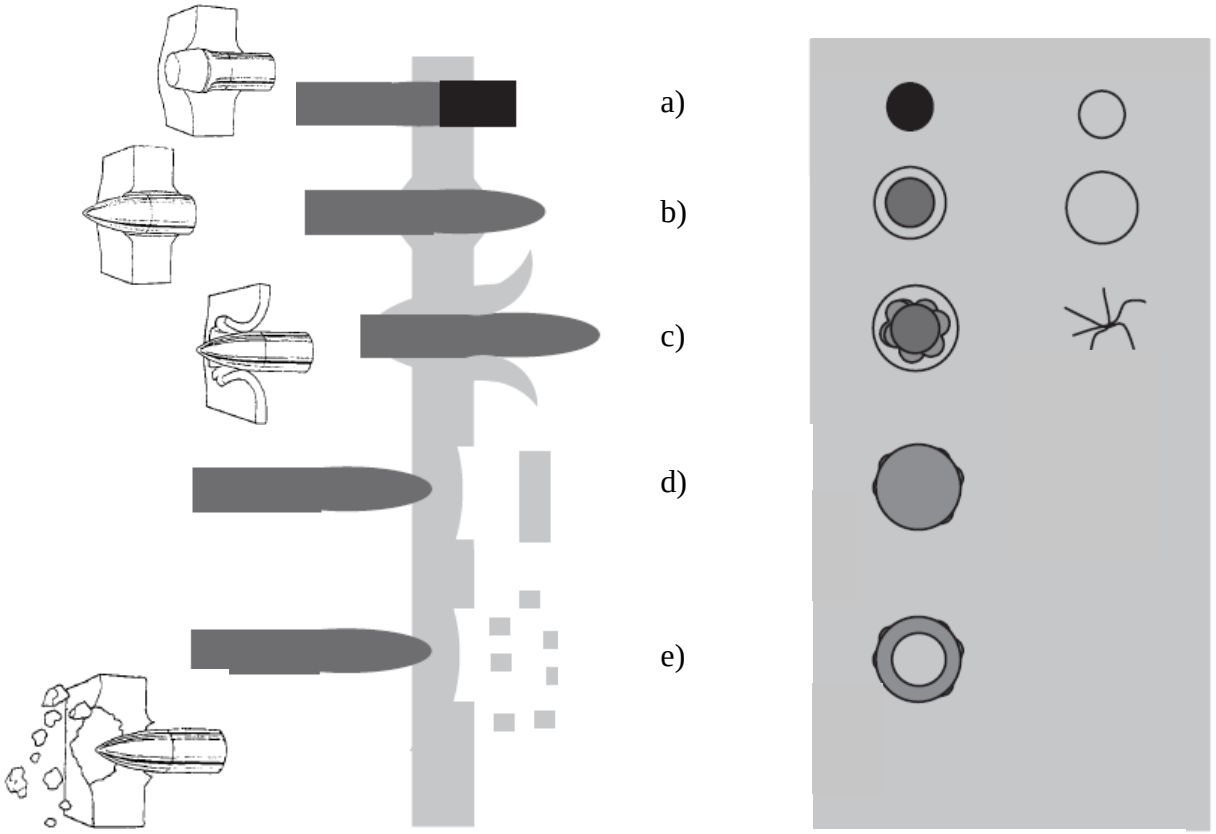
- **Low velocity regime (0-50 m/s)** - (engl. *Low velocity regime*) pri ovim brzinama javljaju se elastične i plastične deformacije mete. Pomaci uslijed savijanja mete su veliki i utjecaj projektila na metu nije lokalan, već se širi na okolne konstrukcijske elemente koji utječu na eventualno probijanje. Ova kategorija obuhvaća udare uslijed ispadanja objekata ili sudara vozila (kopnenih ili brodova)
- ***Sub-ordnance velocity regime* (50-500 m/s)** - pri ovim brzinama deformacije projektila (uglavnom tvrđi od mete) su elastične, a meta se plastično deformira. Utjecaj udara projektila je lokaliziraniji sa porastom brzine – plastična deformacija mete događa se u zoni oko samog mjesta udara projektila

- ***Ordnance velocity regime* (500-1300 m/s) -** pri ovim brzinama kinetička energija se pretvara u rad plastične deformacije i projektila i mete. S rastom brzine raste i utjecaj gustoće materijala na probijanje. Lokalna zona plastične deformacije sve više je ograničena na područje veličine 2-3 promjera projektila i globalne deformacije mete sve su manje vidljive. U ovo područje brzina spada i većina vojnih projektila – od metaka do penetratora visoke kinetičke energije
- ***Ultra-ordnance velocity regime* (1300-3000 m/s) –** pri ovim brzinama ponašanje materijala mete se može opisivati 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
- ***Hypervelocity regime* (> 3000 m/s) –** 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.

Osim brzine projektila kojom on udara u metu, kriterij prema kojem se dijele udari je i meta u koju projektil udara. Razlikuju se 4 skupine meta [5]:

- **Polubeskonačne -** mete pri kojima nema utjecaja udaljenog ruba (stražnje površine; engl. *distal boundary*) na proces penetracije
- **Debele -** mete pri kojima postoji utjecaj udaljenog ruba (stražnje površine; engl. *distal boundary*) tek nakon što projektil prođe određeni put pri penetraciji u metu
- **Srednje debele -** mete pri kojima postoji utjecaj udaljenog ruba (stražnje površine; engl. *distal boundary*) na projektil prilikom cijelog procesa penetracije
- **Tanke -** mete kod kojih nema gradijenata deformacije po debljini

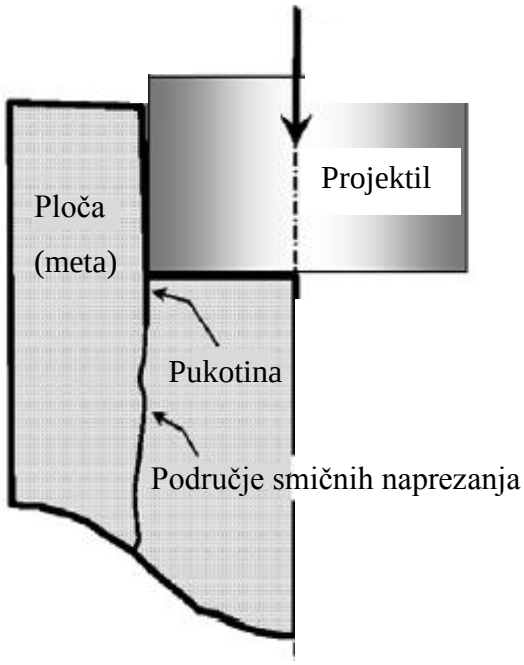
U terminalnoj balistici poznato je više načina popuštanja pri perforaciji projektila u metu (slika 3). Oni se javljaju ovisno o svojstvima materijala mete i obliku vrha projektila. Jedan od načina popuštanja je način pri kojem se izbija čep iz mete (engl. *plugging*; slika 3 a). Čep (engl. *plug*) nastaje prilikom udara projektila ravnog vrha ili u slučajevima udara hemisferičnog projektila pri brzinama oko granične brzine probijanja (najmanja brzina pri kojoj projektil perforira metu).



Slika 3. Načini popuštanja pri perforaciji projektila u metu [3], [5]

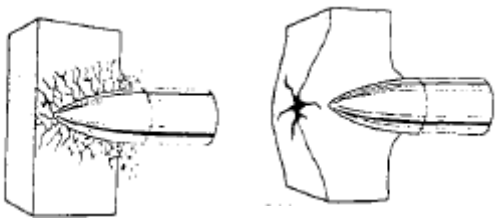
Čep nastaje uslijed djelovanja mehanizma adijabatskog smicanja pri kojem se formira usko područje smičnih naprezanja (slika 4 [6]). Na tom području se sav rad plastične deformacije pretvara u toplinu, koja uzrokuje lokalni rast temperature, jer zbog brzine deformacije i cijelog procesa ne stigne proći 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 projektila 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 3 b) pri čemu projektil penetrira metu u točki udara i širi rupu gurajući radijalno materijal (engl. *piercing*) [5]. Način popuštanja prikazan na slici 3 c) (engl. *petaling*) karakterističan je za udare „šiljastih“

projektila u tanke mete (ploče) te u nekim slučajevima za udare projektila s ravnim vrhom pri brzinama blizu graničnim brzinama probijanja. Ovakav način popuštanja karakterizira stvaranje oblika rupe na izlaznoj strani koji nalikuje na latice cvijeta (engl. *petal*=latica). To se događa uslijed visokih radijalnih i cirkularnih naprezanja na mjestu udara vrha projektila nakon prolaska inicijalnog vala naprezanja. Zbog toga dolazi do pucanja ploče na tom mjestu i formiranja „latica“ uslijed širenja pukotine u radijalnom smjeru te momenata savijanja [5].



Slika 4. Formiranje čepa pri udaru (engl. plugging) [6]

Načini popuštanja na slikama 3 d) i 3 e) slični su i ne uključuju nužno perforaciju projektila. Kod načina popuštanja e) je karakteristična fragmentacija na stražnjoj površini uzrokovana refleksijom vala naprezanja na stražnjoj površini mete (ploče). Ovo je karakteristično za materijale koji imaju veću tlačnu čvrstoću od vlačne čvrstoće. Način popuštanja d) je sličan modu e), ali lom na stražnjoj površini je rezultat propagacije pukotine inicirane na lokalnoj nehomogenosti materijala uslijed velike deformacije ploče [3]. Kod krhkih materijala manje gustoće javlja se i krhki način popuštanja prikazan na slici 5 a). Način popuštanja sa dominantno radijalnim smjerom širenja pukotine (slika 5 b) na stražnjoj površini mete karakterističan je za keramičke materijale čija vlačna čvrstoća je niža od tlačne čvrstoće, no javlja se i kod nekih čelika [3].



a) b)

Slika 5. Krhki način popuštanja (a) i način popuštanja sa radijalnim širenjem pukotine (b) [5]

Postoji nekoliko pristupa u terminalnoj balistici za određivanje razine oklopne zaštite elemenata oklopa (pojedinih ploča, lijevanih blokova) ili konfiguracija oklopa. Definitivno najskuplji pristup je empirijski pristup koji se temelji na eksperimentalnom određivanju podataka za niz slučajeva probijanja raznih konfiguracija oklopa i projektila i slučajeva udara (ovisno o brzini udara, kutu udara itd.). Empirijski modeli temelje se na izradi krivulja iz eksperimentalnih podataka (npr. metodom najmanjih kvadrata) pri čemu se ne pokušava uzeti u obzir nikakve fizikalne pojave, nego se izvodi funkcija isključivo na temelju podataka [3]. Eksperimentalno ispitivanje skupo je iz razloga što je za njega potreban eksperimentalni postav na kojem se mora moći upravljati uvjetima udara (npr. brzinom udara projektila) i na kojem mora postojati sustav praćenja događaja pri udaru (vizualni sustav ili radiografski sustav). Također, potrebno je izvesti veliki broj ispitivanja kako bi se prikupio dovoljan broj podataka za različite slučajeve ili konfiguracije. Prednost je što ovakav pristup daje točne rezultate koji se mogu očekivati pri upotrebi konačne konstrukcije.

Drugi pristup je analitički pristup koji se sastoji od matematičkog modela izvedenog prema poznatim jednadžbama koje pokušavaju opisati fizikalne pojave pri udaru, ali uz određena pojednostavljenja. Pojednostavljenja su nužna jer ne postoji jedinstvena teorija koja opisuje događaje pri udaru, nego se u matematički model implementiraju parcijalne teorije koje opisuju određeni dio udara ili koje dobro opisuju ponašanje materijala pri probijanju sa određenim modom popuštanja. Takvi matematički modeli se moraju validirati (usporediti sa realnim rezultatima) u smislu da se za određene materijale i konfiguracije moraju odrediti parametri modela na temelju eksperimentalnih podataka. To zahtijeva korištenje eksperimentalnog pristupa, ali u manjoj mjeri. Problem analitičkog pristupa je da su matematički modeli dosta ograničeni na konkretne uvjete tj. vrijede za konkretne materijale i/ili konfiguracije mete i zapravo je njihova fleksibilnost ograničena [3].

Treći pristup je upotreba numeričkih modela. Oni se temelje na rješavanju cjelovitih sustava jednadžbi mehanike kontinuuma bez previše pojednostavljenja numeričkim tehnikama poput metode konačnih elemenata ili metode konačnih razlika [3]. Predstavljaju općenitiji pristup u odnosu na analitičke modele, no cijena toga je računalna zahtjevnost tj. potrebno je osigurati dovoljno računalnih resursa za korištenje modela u razumnom vremenu. Nisu potpuno neovisni od eksperimentalnog pristupa, jer se moraju validirati, no ta validacija je generalnija od validacije analitičkih modela i po tome su fleksibilniji za korištenje. Dodatna zahtjevnost ovakvih modela je da moraju koristiti dosta vjerne materijalne modele. Materijalni modeli moraju biti relativno detaljno definirani u smislu da se puno fizikalnih pojava mora opisati jednadžbama sa odgovarajućim parametrima. U suprotnom se model ne ponaša dovoljno vjerno u svim slučajevima. Parametri materijalnih modela određuju se usporedbom rezultata numeričkih modela sa eksperimentalnim rezultatima.

S obzirom na opisane pristupe, u ovom diplomskom radu je odabran pristup gdje se koristi numerički model, jer je najprikladniji za razinu diplomskog rada. Cilj je provođenjem numeričke analize steći znanje i iskustvo u ovom području na način da se prouči literatura i kroz simulacije odrede osnovni utjecaji raznih čimbenika pri udarima. U drugom i trećem poglavlju objašnjen je način na koji su numeričke simulacije postavljene i izvedene, problematika i validacija materijalnog modela te kakvi su utjecaji osnovnih čimbenika pri udarima na probijanje

1.1. Metoda numeričke integracije

Upotreba numeričkih modela temelji se na rješavanju sustava diferencijalnih jednadžbi numeričkim metodama. Za probleme tranzijentnih nelinearnih dinamičkih pojava, u koje spadaju i udari velikom brzinom, uobičajena je upotreba direktne eksplicitne metode integriranja diferencijalnih jednadžbi. Računalni rješavač (engl. *solver)* ugrađen u Abaqus/Explicit temelji se na primjeni metode središnjih razlika za vremensko integriranje jednadžbi gibanja ([7], poglavlje 2.4.5. *Abaqus Theory Manual*). Eksplicitne metode općenito funkcioniraju tako da nepoznate veličine za naredni vremenski trenutak $t+\Delta t$ određuju na temelju poznatih veličina za trenutak t, bez potrebe za iteracijskim postupcima unutar inkrementa. Postupak integriranja jednadžbi gibanja pomoću metode središnjih razlika počinje iz općeg oblika sustava jednadžbi gibanja u matričnom obliku:

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{u} = \mathbf{R}(t), \quad \textbf{(1)}$$

gdje su **M, C i K** matrice masa, prigušenja i krutosti, a $\ddot{\mathbf{u}}$, $\dot{\mathbf{u}}$, **u** i **R**(*t*) vektori ubrzanja, brzina i pomaka te vanjskog opterećenja. Za određivanje vektora ubrzanja za trenutak *t*, potrebno je riješiti jednadžbu (2), koja proizlazi iz jednadžbe (1) [8]:

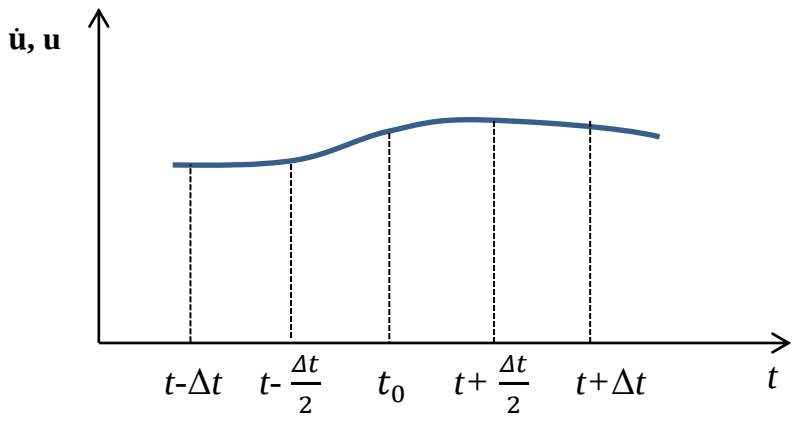
$$\ddot{\mathbf{u}}_t = \mathbf{M}^{-1} \cdot \mathbf{F}^{\mathbf{r}}, \quad \textbf{(2)}$$

gdje je $\mathbf{F}^{\mathbf{r}}$ vektor rezidualnih sila definiran kao razlika između vektora vanjskog opterećenja **R**(*t*) i vektora unutarnjih sila $\mathbf{F}^{\mathbf{i}}$:

$$\mathbf{F}^{\mathbf{r}} = \mathbf{R}(t) - \mathbf{F}^{\mathbf{i}} = \mathbf{R}(t) - (\mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{u}}_t + \mathbf{K} \cdot \mathbf{u}_t). \quad \textbf{(3)}$$

Vidljivo je da je za određivanje vektora rezidualnih sila potrebno poznavati vektor brzina $\dot{\mathbf{u}}$ i vektor pomaka **u** za trenutak *t*. Za prvi trenutak t_0, $\dot{\mathbf{u}}$ i **u** su poznati iz početnih uvjeta koji su obično zadani.

Nakon toga, iz poznatih veličina vektora ubrzanja $\ddot{\mathbf{u}}_t$, brzina $\dot{\mathbf{u}}_t$ i pomaka $\mathbf{u}_t$, određuju se za sljedeći trenutak $t+\Delta t$ vektori pomaka $\mathbf{u}_{t+\Delta t}$ i brzine $\dot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t}$ **(**slika 6).



Slika 6. Definicija vremenskih trenutaka pri metodi središnjih razlika

To se radi prema sljedećem postupku [8]:

- Izračunava se $\mathbf{u}_{t-\Delta t}$ prema jednadžbi (4) koristeći poznate $\mathbf{u}_t$, $\dot{\mathbf{u}}_t$ i $\ddot{\mathbf{u}}_t$:

$$\mathbf{u}_{t-\Delta t} = \mathbf{u}_t - \Delta t \cdot \dot{\mathbf{u}}_t + \frac{(\Delta t)^2}{2} \cdot \ddot{\mathbf{u}}_t \,. \quad \textbf{(4)}$$

- Izračunava se $\dot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t/2}$ uvrštavanjem $\mathbf{u}_{t-\Delta t}$ u jednadžbu (5):

$$\dot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t/2} = \frac{\mathbf{u}_t - \mathbf{u}_{t-\Delta t}}{\Delta t}. \quad \textbf{(5)}$$

- Izračunava se $\dot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t/2}$ uvrštavanjem $\dot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t/2}$ u jednadžbu (6):

$$\dot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t/2} = \Delta t \cdot \ddot{\mathbf{u}}_t + \dot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t/2}\,. \quad \textbf{(6)}$$

- Izračunava se $\mathbf{u}_{t+\Delta t}$ uvrštavanjem $\dot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t/2}$ u jednadžbu (7):

$$\mathbf{u}_{t+\Delta t} = \Delta t \cdot \dot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t/2} + \mathbf{u}_t. \quad \textbf{(7)}$$

- Izračunava se $\dot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t}$ prema jednadžbi (8) uz pretpostavku konstantnog ubrzanja tijekom cijelog inkrementa ($\ddot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t/2} = \ddot{\mathbf{u}}_t$):

$$\dot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t} = \Delta t \cdot \ddot{\mathbf{u}}_t + \dot{\mathbf{u}}_t. \quad \textbf{(8)}$$

Osim vektora brzine i pomaka za trenutak $t+\Delta t$, na razini elementa (u integracijskim točkama) određuje se inkrementalna vrijednost deformacije $\mathrm{d}\boldsymbol{\varepsilon}$, izračunavaju se naprezanja iz konstitutivnih jednadžbi:

$$\boldsymbol{\sigma}_{t+\Delta t} = f(\boldsymbol{\sigma}_t, \mathrm{d}\boldsymbol{\varepsilon}), \quad \textbf{(9)}$$

te se izračunava vektor unutarnjih sila $\mathbf{F}^{\mathbf{i}}_{t+\Delta t}$. Nakon toga, moguće je prijeći na sljedeći vremenski trenutak postavljajući $t+\Delta t$ kao trenutnu vrijednost vremena i ponoviti postupak počevši sa jednadžbom (2).

Kako se u jednadžbi (8) pretpostavlja konstantna vrijednost ubrzanja po cijelom inkrementu, rješenja nisu potpuno točna, nego predstavljaju aproksimaciju. Točnost aproksimacije moguće je osigurati smanjenjem vremenskog inkrementa. No, s obzirom da je ova metoda uvjetno stabilna, postoji donja granica veličine stabilnog vremenskog inkrementa i računa se prema jednadžbi (10) ([7], poglavlje 2.4.5. *Abaqus Theory Manual*):

$$\Delta t_{\text{stab}} = \frac{2}{\omega_{\max}}, \quad \textbf{(10)}$$

gdje je $\omega_{\max}$ najveća vlastita frekvencija sustava konačnih elemenata. Kako određivanje najveće vlastite frekvencije sustava može biti računalno zahtjevno, u Abaqus/Explicit-u ugrađen je kriterij za konzervativnu procjenu stabilnog vremenskog inkrementa ([7], poglavlje 2.4.5. *Abaqus Theory Manual*):

$$\Delta t_{\text{stab}} = min\left(\frac{L_{\text{e}}}{c_{\text{d}}}\right), \quad \textbf{(11)}$$

gdje je L_{e} karakteristična duljina elementa, a c_{d} je brzina širenja dilatacijskog vala kroz materijal, koja ovisi o svojstvima materijala (gustoći, modulu elastičnosti). Prema tome se može zaključiti da na stabilnost analize utječe i mreža konačnih elemenata i svojstva materijala.

Prednost eksplicitne metode je u manjoj računalnoj zahtjevnosti, pogotovo jer se za vremenski inkrement ne vrši postupak iterativnog postizanja ravnoteže, kao u implicitnim metodama. Također, bitna ušteda vremena postiže se korištenjem dijagonalne matrice masa umjesto pune matrice masa [8]. To omogućava zapisivanje dijagonale matrice u obliku vektora, što je računalno povoljnije te, bitnije, omogućava jednostavnije izračunavanje vrijednosti ubrzanja u vektoru ubrzanja $\ddot{\mathbf{u}}$. Pojedine vrijednosti ubrzanja se mogu izračunati koristeći samo podatke o masi i rezidualnoj sili vezanim uz stupanj slobode gibanja u čijem smjeru djeluje ubrzanje prema jednadžbi (12) [8]:

$$\ddot{u}_i = \frac{F_i^{\text{r}}}{m_i}, \quad \textbf{(12)}$$

2. NUMERIČKE SIMULACIJE – OPIS I VALIDACIJA MATERIJALNOG MODELA

U ovim simulacijama odabran je standardni Lagrangeov opis diskretizacije kontinuuma konačnim elementima, gdje su konačni elementi vezani za geometriju i mogu se kretati u prostoru i deformirati. Drugi standardni pristup je Eulerov opis, gdje su konačni elementi vezani uz prostor. Materijal se kreće kroz prostor na način da se prati popunjenost elemenata i na temelju toga se zaključuje o deformacijama materijala. Takav pristup često se koristi kod opisivanja gibanja fluida. Lagrangeov pristup odabran je zato jer je najčešće korišten u literaturi koja se bavi ovom problematikom, npr. u [4], [6], [9], [10], [11] ili [12]. Uz to, najmanje je računalno zahtjevan u odnosu na druge pristupe. U literaturi je problematika numeričkih simulacija udara projektila uglavnom vezana uz materijalni model i numeričke probleme uslijed velikih deformacija. Alternativni pristupi primjenjeni su radi rješavanja numeričkih problema uslijed velikih deformacija – prvenstveno distorzije elemenata kod Lagrangeovog opisa. SPH pristup temelji se na bezmrežnoj metodi, što eliminira problem distorzije elemenata, gdje se kontinuum diskretizira česticama, između kojih nije potrebno definirati veze, pomoću kojih se aproksimira bazna prostorna funkcija. Takav pristup koristi se i za opisivanje gibanja fluida, a u primjeni na probleme udara pokazuje dobre rezultate pri većim brzinama udara (iznad 1300 m/s) gdje se materijal počinje ponašati sličnije fluidu. Također se problemi udara mogu opisivati kombinacijom Eulerovog i Lagrangeovog opisa (CEL, engl. *Coupled Euler-Lagrange*), gdje se tijelo kod kojeg se javljaju velike deformacije opisuje pomoću Eulerove fiksne prostorne mreže, a ostatak pomoću Lagrangeove mreže. Još jedna mogućnost rješavanja numeričkih problema uslijed velikih distorzija elemenata je primjena algoritama adaptivnog umrežavanja tijekom simulacije. Tim pristupom se distorzija elemenata izbjegava na način da se prilikom detektiranja distorzije (prema kriteriju energije deformiranosti) generira nova mreža prema trenutnoj geometriji (koja uključuje deformacije). Stvara se novi sustav jednadžbi prema novoj mreži i rješava se uobičajenim pristupom kao i kod Lagrangeovog pristupa, sve do kraja događaja ili do sljedeće detekcije distorzije elemenata. Nova mreža generira se tako da se na mjestima gdje je parametar relativne greške iznad zadane granične vrijednosti usitnjava mreža dok se ne dobije mreža koja u svim elementima zadovoljava kriterij parametra relativne greške.

Alternativni pristupi (SPH, CEL, i adaptivno umrežavanje) nisu korišteni zbog ograničenosti vremena i opsega diplomskog rada, relativno dobrih rezultata sa Lagrangeovim opisom te zbog toga što se numerički problemi distorzije nisu pojavljivali u toj mjeri da bi onemogućavali simulacije.

2.1. Materijalni model

Materijalni model je pojam koji označava skup pravila u obliku jednadžbi koja opisuju ponašanje materijala ovisno o veličinama poput npr. deformacije. Ta pravila (odnosno jednadžbe) vrijede za određeno područje - npr. pravilo u obliku jednadžbe je Hookeov zakon koji vrijedi u elastičnom području. Prema Hookeovom zakonu, između naprezanja i deformacija postoji linearna veza preko materijalnih konstanti. Elastično područje je zbog te linearne veze najjednostavnije područje za opisati. Ostala područja su područje plastičnog ponašanja materijala te područje pri kojem se u materijalu javlja oštećenje. Plastično područje ponašanja materijala označava ponašanje materijala pri kojem se javljaju trajne i nepovratne deformacije. Slijedi poslije elastičnog područja nakon što se prijeđe granica tečenja i ovisno o vrsti materijala se može opisati na više načina. Najjednostavnije je karakteristiku (funkciju ovisnosti naprezanja o deformaciji) u plastičnom području proglasiti idealnom pri čemu naprezanje sa rastom deformacije ostaje konstantno. Ukoliko to ne odgovara dovoljno realnom ponašanju materijala, karakteristika uključuje očvršćenje (rast naprezanja sa porastom deformacije) ili mekšanje (pad naprezanja sa porastom deformacija) materijala. Područje oštećenja materijala opisuje inicijaciju i propagaciju pukotine u materijalu koja završava lomom ([13]) ukoliko prije toga ne dođe do rasterećenja materijala. Inicijacija pukotine kriterij je koji dijeli plastično područje od područja oštećenja i označava početak smanjivanja modula elastičnosti materijala.

2.1.1. Materijalni model ploče

Materijalni model u literaturi vezanoj uz udare ([4], [6] - [12]) najviše utječe na razinu vjernosti simulacija u odnosu na eksperimente. Model za plastično područje u većini radova ([6], [11], [12], [14]) je osnovni Johnson-Cook-ov model plastičnosti ([15]) koji uključuje ovisnost naprezanja tečenja o plastičnoj deformaciji (prva zagrada), brzini deformacije (druga zagrada) i temperaturi (treća zagrada). Općenito se pravilo koje definira vezu naprezanja i deformacija naziva konstitutivna jednadžba. Za Johnson-Cook-ov model plastičnosti glasi:

$$\sigma_{\mathrm{T}} = \left[A + B \cdot {\varepsilon_{\mathrm{pl}}}^{n}\right] \cdot \left[1 + C_1 \cdot \ln\frac{\dot{\varepsilon_{\mathrm{pl}}}}{\dot{\varepsilon_0}}\right] \cdot \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_{\mathrm{melt}} - T_0}\right)^{m}\right]. \quad \textbf{(13)}$$

Na taj način uključuje efekte očvršćivanja materijala i mekšanja materijala uslijed povišenja temperature, no ti efekti nisu međusobno povezani, što se navodi kao nedostatak Johnson-Cook modela plastičnosti [16]. Model je određen sa 5 parametara: *A*, *B*, C_1, *n* i *m*, koji se određuju iz ispitivanja materijala statičkim vlačnim pokusom te nizom ispitivanja na Split-Hopkinsonovoj šipci pod različitim brzinama deformacije i temperaturama. *A* je konvencionalna granica tečenja, *B* i *n* su parametri koji opisuju očvršćenje uslijed deformacije (engl. *strain hardening*), C_1 je konstanta brzine deformacije, a *m* je parametar koji opisuje mekšanje uslijed promjene temperature [15]. $\dot{\varepsilon_0}$ je referentna brzina deformacije, T_0 je sobna temperatura, a T_{melt} je talište materijala [15].

Drugi korišteni materijalni model u pronađenoj literaturi je modificirani Johnson-Cook model koji uključuje povezanost između očvršćivanja i mekšanja materijala uslijed rasta temperature ([4]) i čiji izraz za naprezanje tečenja glasi:

$$\sigma_{\mathrm{T}} = \left[A + B \cdot {\varepsilon_{\mathrm{pl}}}^{n}\right] \cdot \left[1 + \frac{\dot{\varepsilon_{\mathrm{pl}}}}{\dot{\varepsilon_0}}\right]^{C_2} \cdot \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_{\mathrm{melt}} - T_0}\right)^{m}\right]. \quad \textbf{(14)}$$

Parametri *A*, *B*, *n*, *m*, $\dot{\varepsilon_0}$, T_0 i T_{melt} su isti kao i kod osnovnog modela, a razlika je u drugoj zagradi koja opisuje utjecaj brzine deformacije na naprezanje tečenja. Parametar C_2 isto određuje utjecaj brzine deformacije na naprezanje tečenja, ali nije ista vrijednost kao parametra C_1 u osnovnom modelu tj. jednadžbi (13).

Modela koji opisuje oštećenje u materijalu korištenih u literaturi je Johnson-Cook-ov model inicijacije i propagacije oštećenja u materijalu ([17]). On razinu oštećenja u materijalu opisuje pomoću parametra *D* koja se određuje pomoću izraza (15):

$$D = \sum \frac{\Delta\varepsilon_{\mathrm{pl}}}{\varepsilon_{\mathrm{ekv}}^{\mathrm{f}}}, \quad \textbf{(15)}$$

gdje je $\Delta\varepsilon_{\mathrm{pl.ekv}}$ inkrementalno povećanje plastične deformacije u jednom koraku integracije, a $\varepsilon_{\mathrm{ekv}}^{\mathrm{f}}$ je ekvivalentna deformacija pri lomu. $\varepsilon_{\mathrm{ekv}}^{\mathrm{f}}$ se računa prema izrazu (16):

$$\varepsilon_{\text{ekv}}^{\text{f}} = \left[D_1 + D_2{}^{D_3 \cdot \sigma^*}\right] \cdot \left[1 + D_4 \cdot \ln\frac{\dot{\varepsilon}_{\text{pl.}}}{\dot{\varepsilon}_0}\right] \cdot \left[1 + D_5 \cdot \frac{T - T_0}{T_{\text{melt.}} - T_0}\right], \quad \textbf{(16)}$$

gdje su D_{1-5} parametri Johnson-Cook-ovog modela, a σ^* je bezdimenzijski omjer hidrotatskog i ekvivalentnog naprezanja:

$$\sigma^* = \frac{\sigma_{\text{m}}}{\bar{\sigma}}, \quad \textbf{(17)}$$

gdje je σ_{m} prosječna vrijednost normalnih naprezanja, a $\bar{\sigma}$ ekvivalentno naprezanje prema Teoriji najveće gustoće distorzijske energije deformacija:

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{2}\left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2\right]}. \quad \textbf{(18)}$$

Lom u materijalu (popuštanje materijalnih točaka) se događa kada parametar oštećenja dostigne vrijednost 1. Vrijednost parametra oštećenja D=0 označava stanje materijala bez ikakvog oštećenja. Općenito je parametar oštećenja u mehanici kontinuuma u najosnovnijem obliku definiran kao omjer površine koje zauzimaju pukotine i šupljine te početne površine proizvoljnog presjeka tijela [18]:

$$D = \frac{A_{\text{p}}}{A_0}. \quad \textbf{(19)}$$

Prema toj definiciji, može se vidjeti da vrijednost 0 označava stanje gdje u materijalu ne postoji oštećenje, jer je A_{p} nula, što znači da u materijalu nema pukotina ni šupljina. Također, za suprotni slučaj, ukoliko je površina pukotina i šupljina jednaka početnoj površini presjeka, događa se lom i vrijednost parametra oštećenja je 1.

Već su sami autori, koji su predložili model, u [17] primijetili da model ne opisuje lom dovoljno dobro tj. da lom u materijalu pri eksperimentima se događa prije nego što to model predvidi. Iz tog razloga su u literaturi predloženi razni drugi modeli (tj. karakteristike područja oštećenja) za opisivanje područja oštećenja materijala. Jedan od uspješnijih modela je model razvijen u [4]. Modificiran je kriterij loma dodavanjem parametra loma D_{c} u jednadžbu (15), koja sada glasi:

$$D = \sum D_{\mathrm{c}} \frac{\Delta \varepsilon_{\mathrm{pl.ekv}}}{\varepsilon_{\mathrm{ekv}}^{\mathrm{f}}}. \quad \textbf{(20)}$$

Lom se ovdje događa (materijalne točke popuštaju) kada parametar oštećenja D dostigne vrijednost parametra loma D_{c}, čak i ako je vrijednost parametra D_{c} manja od 1, što omogućava da se nedostatak Johnson-Cook-ovog modela ispravi. Također, primijenjen je i drugačiji izraz za ekvivalentnu deformaciju pri lomu, prema [19]:

$$\varepsilon_{\mathrm{ekv}}^{\mathrm{f}} = \left[D_1 + D_2{}^{D_3 \cdot \sigma^*}\right] \cdot \left[1 + \frac{\dot{\varepsilon_{\mathrm{pl}}}}{\dot{\varepsilon_0}}\right]^{D_4} \cdot \left[1 + D_5 \cdot \frac{T - T_0}{T_{\mathrm{melt}} - T_0}\right], \quad \textbf{(21)}$$

gdje je parametar D_4 u pravilu različite vrijednosti od parametra D_4 iz jednadžbe (16). Osim modela za područje oštećenja, modificirana je i konstitutivna jednadžba za plastično područje tako da model plastičnosti uključuje i mekšanje materijala uslijed pojave oštećenja u materijalu. Konstitutivna jednadžba za plastično područje tako glasi:

$$\sigma_{\mathrm{T}} = [1 - D]\left[A + B \cdot {\varepsilon_{\mathrm{pl}}}^n\right] \cdot \left[1 + \frac{(1 - D)\dot{\varepsilon_{\mathrm{pl}}}}{\dot{\varepsilon_0}}\right]^{C_2} \cdot \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_{\mathrm{melt}} - T_0}\right)^m\right]. \quad \textbf{(22)}$$

Ovakav materijalni model podrazumijeva adijabatski događaj tj. pretpostavlja da se toplina, koja se pri udaru pretvori iz rada plastične deformacije, zbog brzine ne stigne prenijeti kroz materijal nego se zadržava u području oko mjesta udara i uzrokuje povišenje temperature. No, tu postoje i gubici pa između generirane topline i povišenja temperature postoji Taylor-Quinney-eva empirijska konstanta. Izraz za povišenje temperature tako glasi [4]:

$$\Delta T = \int_0^{\varepsilon_{\mathrm{pl}}} \chi \frac{\sigma_{\mathrm{T}}}{\rho c_{\mathrm{p}}} \mathrm{d}\varepsilon_{\mathrm{pl}}. \quad \textbf{(23)}$$

2.1.2. Materijalni modeli korišteni u simulacijama

Materijalni model korišten u simulacijama u najvećoj je mjeri određen mogućnostima *software-a* tj. implementiranošću materijalnog modela u *software* (konkretno u Abaqus). Kako je implementacija korisničkih materijalnih modela moguća jedino pomoću VUMAT rutine, moguće je bilo koristiti samo standardno ugrađene modele u Abaqusu. S obzirom na to, materijalni model korišten u simulacijama predstavlja približni materijalni model, temeljen

na aproksimaciji eksperimentalnih rezultata iz [4], pomoću kojeg simulacije mogu dovoljno dobro raditi kako bi se ispitali osnovni utjecaji na probijanje pri udarima.

Pretpostavka je da je materijal izotropan, tj. da su mu svojstva ista bez obzira na smjer. U skladu s tim i materijalni model je takav da opisuje ponašanje izotropnog materijala.

Linearno područje opisano je standardnim Hookeovim zakonom kojeg definiraju materijalne konstante modula elastičnosti *E* i Poissonovog faktora *v*.

Plastično područje opisano je Johnson-Cook-ovom konstitutivnom jednadžbom (13), koja je ugrađena u Abaqus ([7], poglavlje 23.2.7 *Analysis User's Manual*).

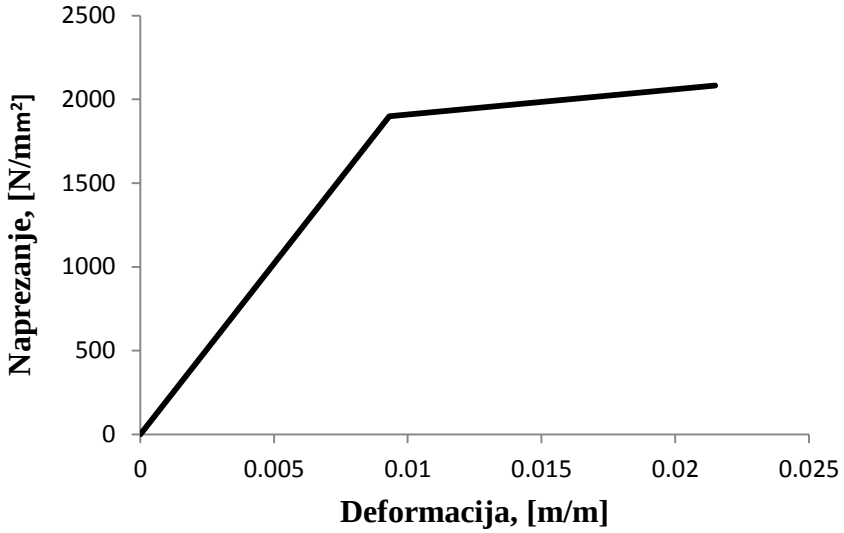
Područje oštećenja opisano je na način da se oštećenja javljaju kada plastična deformacija dosegne vrijednost plastične deformacije pri inicijaciji oštećenja određenu izrazom:

$$\varepsilon_{\mathrm{pl}}^{\mathrm{f}} = \left[D_1 + D_2{}^{D_3 \cdot \sigma^*}\right] \cdot \left[1 + D_4 \cdot \ln \frac{\dot{\varepsilon_{\mathrm{pl}}}}{\dot{\varepsilon_0}}\right] \cdot \left[1 + D_5 \cdot \frac{T - T_0}{T_{\mathrm{melt}} - T_0}\right], \qquad \textbf{(24)}$$

gdje je $\varepsilon_{\mathrm{pl}}^{\mathrm{f}}$ plastična deformacija pri inicijaciji oštećenja u materijalu. Ta vrijednost se za svaki korak integracije određuje i uspoređuje sa trenutnom vrijednošću plastične deformacije u elementu. Takav kriterij inicijacije oštećenja je ugrađen u Abaqus ([7], poglavlje 24.2.2 *Analysis User's Manual*). Propagacija oštećenja u Abaqusu standardno se može definirati na način da se tablično definira ovisnost parametra oštećenja *D* o disipiranoj energiji ili plastičnom dijelu pomaka. No, takav način ugađanja općenitog ponašanja materijalnog modela ovisio bi o previše parametara i ne bi bio jednostavno izvediv. Također, postojalo bi puno rješenja koja bi zadovoljala jednako kao i najjednostavniji slučaj. Stoga je primijenjen najjednostavniji energetski kriterij loma od 0 J , što efektivno znači da se lom događa odmah po zadovoljavanju kriterija inicijacije oštećenja. Na takav način se postiže da se postavljanjem jednog parametra iz jednadžbe (24) može utjecati na inicijaciju oštećenja (tj. trenutak loma) i posredno na vjernost aproksimacije materijalnog modela. Parametar koji se pokazao kao najpovoljnijim i najboljim za ugađanje je parametar D_4 koji uzima u obzir utjecaj brzine deformacije.

Odnos između povišenja temperature i rada plastične deformacije zadan je prema jednadžbi (23) ([7], poglavlje 6.5.4. *Analysis User's Manual*).

Materijalni model projektila uključuje bilinearnu karakteristiku (slika 7) tj. linearnu karakteristiku za elastično područje i linearno plastično očvršćenje u plastičnom području. Također je postavljen kriterij za lom kada deformacija elementa dostigne kritičnu vrijednost deformacije bez obzira na ostale veličine.



Slika 7. Bilinearna karakteristika materijala projektila [4]

2.2. Validacija materijalnog modela

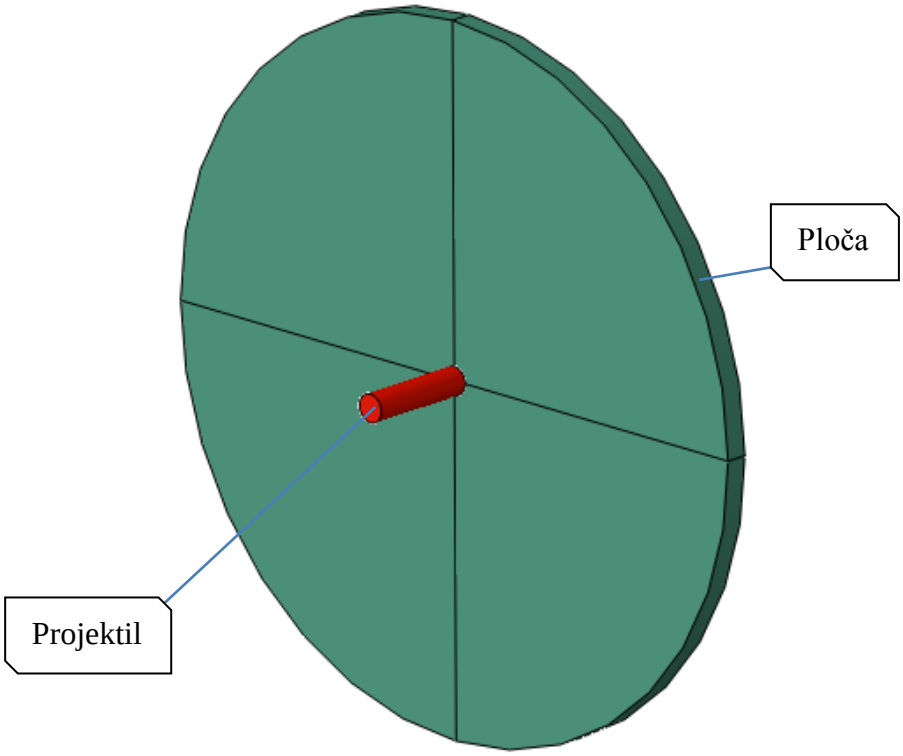
Aproksimaciju modela i numeričke simulacije potrebno je validirati usporedbom sa eksperimentalnim rezultatima. Eksperimentalni rezultati uzeti su iz [4] i simulacije su izvedene kako bi pratile uvjete iz navedene literature. Eksperimentalni rezultati dobiveni su na eksperimentalnom postavu razvijenom na sveučilištu NTNU u Trondheimu (slika 8). Ispitivani su slučajevi udara cilindričnih projektila sa ravnim, koničnim i hemisferičnim vrhom u ploče debljina od 6 do 30 mm s rasponom brzina od 75 do 450 m/s. Projektili su ubrzavani plinskim topom pokretanim tlakom od 200 bara ([20]).



Slika 8. Eksperimentalni postav za ispitivanje probijanja [18]

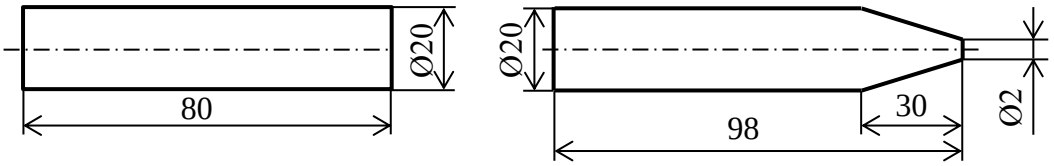
2.2.1. Numerički model ploče

Numerički model ploče je model kružne ploče promjera 500 mm (slika 9). Debljine ploča razlikuju se – 10 mm, 12 mm, 16 mm i 20 mm.



Slika 9. Numerički model ploče i projektila

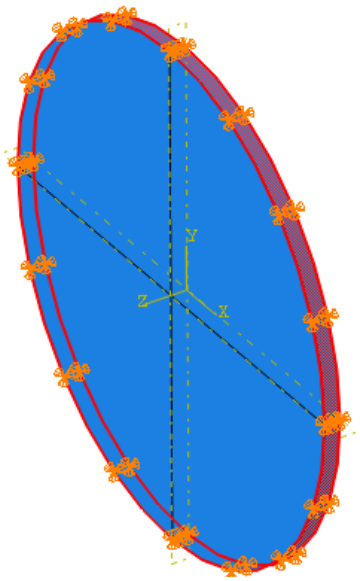
Geometrije projektila prikazane su na slici 10.



Slika 10. Geometrije projektila [4]

2.2.2. Rubni uvjeti

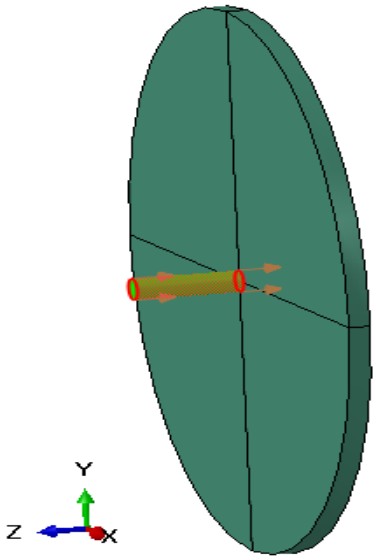
U eksperimentu su korištene ploče kružnog oblika, uklještene pomoću 21 vijka na promjeru 550 mm, tako da je unutarnji promjer prirubnice koja steže ploču 500 mm. U numeričkom modelu to je izmodelirano pomoću uklještenja ploče promjera 500 mm na vanjskoj površini. Na crvenoj površini, prikazanoj na slici 11, postavljeni su rubni uvjeti pomaka, tj. onemogućeni su pomaci u sva tri smjera. Rotacijski stupnjevi slobode gibanja nisu ograničavani, jer C3D8R konačni elementi nemaju rotacijske slobode gibanja.



Slika 11. Rubni uvjeti

2.2.3. Opterećenje

Opterećenje u eksperimentima predstavlja projektil koji svojom brzinom (tj. kinetičkom energijom) udara u ploču. Istovjetno je u simulaciji projektilu narinuto polje početne brzine u negativnom smjeru osi *Z* (osim za slučajeve udara pod kutem), prema ploči, kao što je prikazano na slici 12:



Slika 12. Polje početne brzine projektila

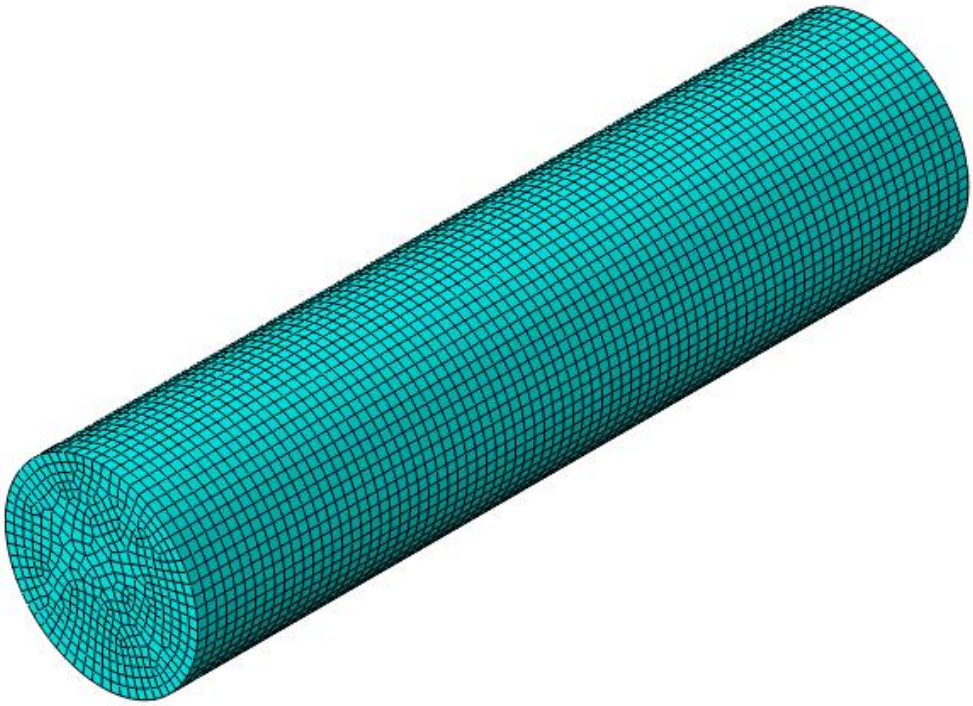
2.2.4. Mreža konačnih elemenata

Mreža konačnih elemenata projektila i ploče sastoji se od linearnih trodimenzijskih heksedarskih konačnih elemenata oznake C3D8R. C3D8R elementi sastoje se od 8 čvorova s tri stupnja slobode gibanja u svakom čvoru – tri pomaka u smjerovima glavnih osi koordinatnog sustava. Elementi su namijenjeni za reduciranu integraciju u jednoj točki koja se nalazi u središtu elementa ([7], poglavlje 3.1.2. *Getting Started with Abaqus: Keywords Edition*). Reducirana integracija koristi se radi izbjegavanja pojave *shear lockinga* (engl. *shear* = smično naprezanje, *locking* = zaključavanje) tj. pojave prevelike krutosti elementa uslijed opterećenja momentom koja se javlja prilikom potpune Gaussove integracije. Naime, kako su C3D8 elementi linearni, tj. funkcije oblika su im pravci, pri savijanju momentima ne mogu dobro opisati rub elementa. Zbog toga se u elementu prividno javljaju dodatna smična naprezanja koja uzrokuju da se ravnoteža elementa zadovoljava sa manjim pomacima. Kako su pomaci manji, općenito ponašanje se može protumačiti kao povećana krutost elementa. Reducirana integacija rješava taj problem na način da se, zbog manje točaka pri Gaussovoj intergraciji tj. smanjenog reda integracije, eliminiraju određeni članovi izraza za Gaussovu integraciju koji uzrokuju *shear lockinga* ([7], poglavlje 3.2.4 *Abaqus Theory Manual*).

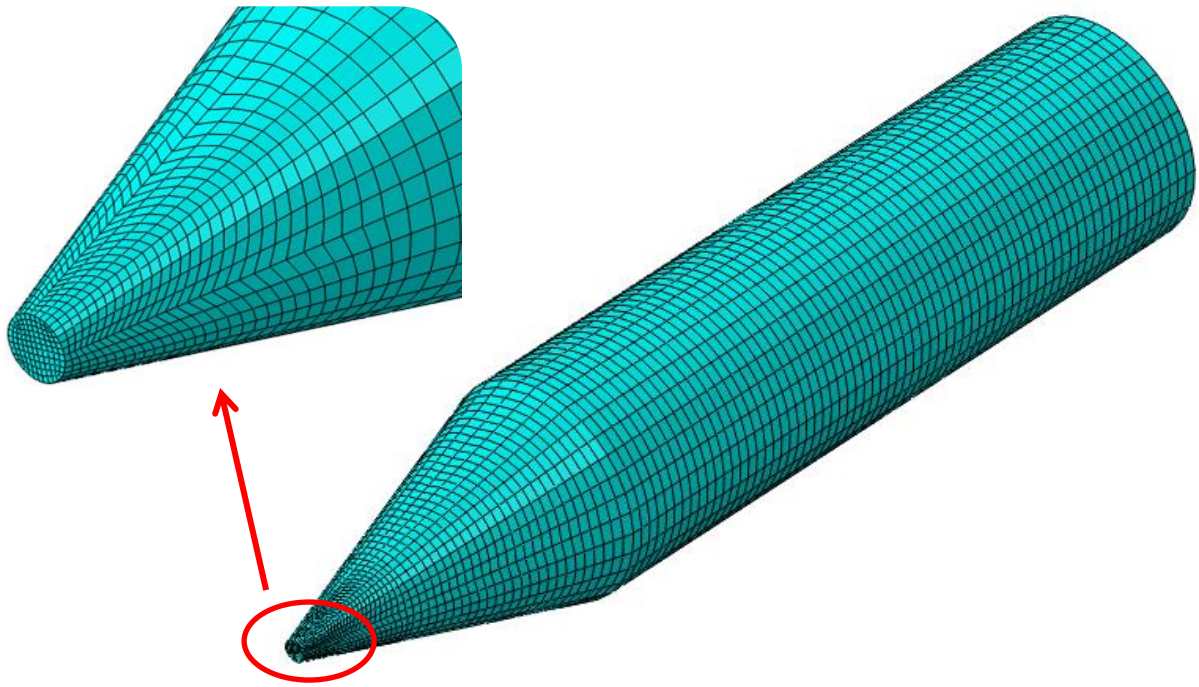
Mreža konačnih elemenata projektila sastoji se od C3D8R elemenata nazivne veličine 1 mm za projektil sa ravnim vrhom (slika 13) te C3D8R elemenata veličine od 0,15 mm do 1 mm za projektil sa koničnim vrhom (slika 14). Podaci o mrežama konačnih elemenata projektila prikazani su u tablici 1.

Tablica 1. Broj elemenata i čvorova mreža konačnih elemenata

C3D8R	Broj konačnih elemenata	Broj čvorova u mreži konačnih elemenata
Projektil s ravnim vrhom	35520	38637
Projektil s koničnim vrhom	13908	16236
Ploča - 10 mm	291100	307776
Ploča - 12 mm	349320	366400
Ploča - 16 mm	465760	483648
Ploča - 20 mm	582200	600896
Ploča - 24 mm	698640	718144



Slika 13. Mreža konačnih elemenata projektila s ravnim vrhom

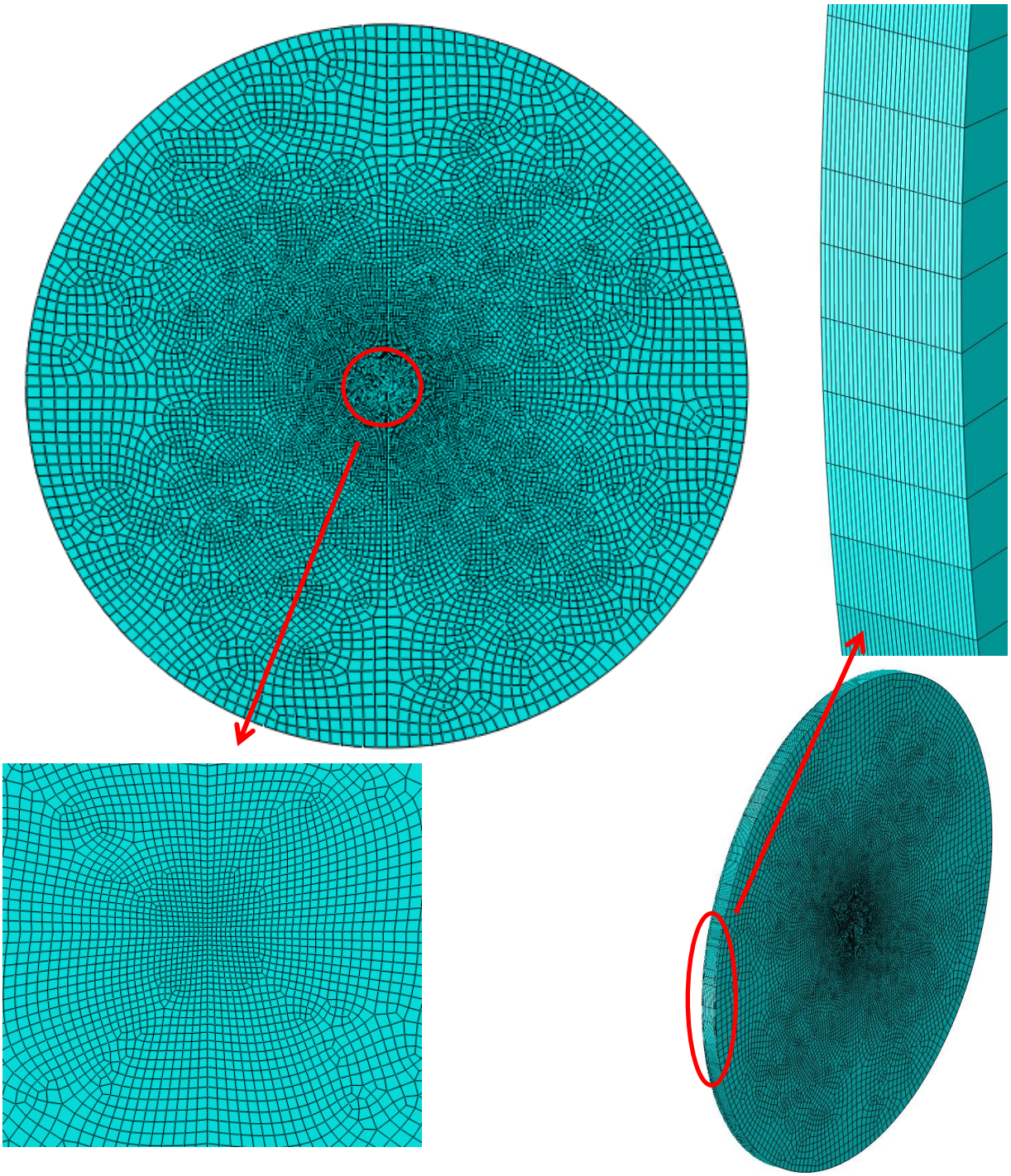


Slika 14. Mreža konačnih elemenata projektila sa koničnim vrhom

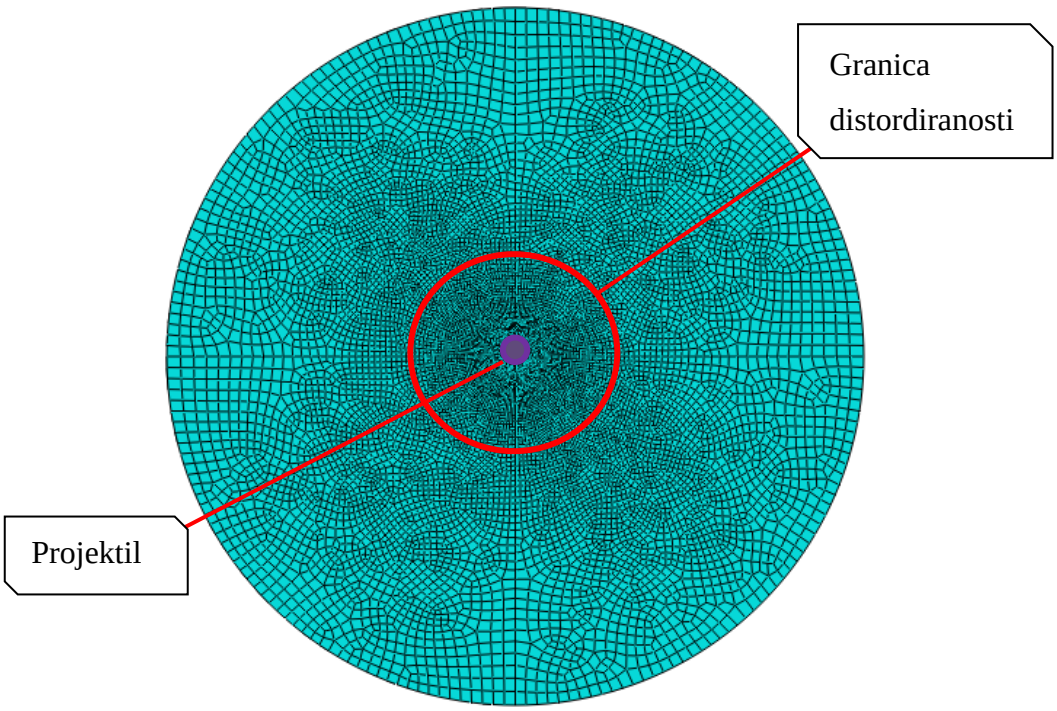
Mreža konačnih elemenata ploče sastoji se od C3D8R elemenata veličine od 0,3 mm do 10 mm. Gustoća mreže najveća je u središtu ploče jer se pri simulacijama na tom mjestu događaju najveće deformacije, s obzirom da tu projektil udara u ploču (slika 15).

Radi uštede računalnih resursa, mreža na vanjskom rubu je rjeđa, što za posljedicu ima da je na vanjskom vijencu distordirana (elementi su plosnati), no to je izvedeno tako da bi se dobio dovoljan broj elemenata po presjeku te kvalitetan oblik elemenata u sredini, gdje se većina događaja odvija. Na slici 16 prikazano je područje mreže gdje elementi zadovoljavaju kriterij odnosa između duljina najveće i najkraće stranice (manje od tri). Iako su elementi na vanjskom vijencu distordirani, područje oko mjesta udara projektila, gdje elementi nisu distordirani prema navedenom kriteriju odnosa stranica, veličine je barem 2 do 3 promjera projektila.

Odabir gustoće mreže napravljen je kao kompromis između male računalne zahtjevnosti mreže konačnih elemenata i broja konačnih elemenata po presjeku koji je u [4] korišten i koji je pokazao dobro rješenje.



Slika 15. Mreža konačnih elemenata ploče



Slika 16. Područje elemenata koji nisu distordirani

2.2.5. Trenje

Trenje u simulacijama uključeno je kao karakteristika pri kontaktu površina sa konstantnom vrijednošću faktora trenja μ od 0,15. Vrijednost je uzeta iz [21], uzimajući u obzir da se radi o projektilu i meti izrađenim od čelika (iako različitih), i konstantna je tj. karakteristika trenja ne ovisi o međusobnoj brzini dvaju tijela u kontaktu.

2.2.6. Kontakt

Kontakt između projektila i ploče definiran je na način da uključuje interakciju između svih mogućih kombinacija površina i elemenata. To pobliže znači da projektil može doći u kontakt sa vanjskim i unutarnjim površinama ploče (ukoliko zbog popuštanja elemenata one postanu vanjske i dođu u kontakt s projektilom). Također, prilikom popuštanja elemenata se može dogoditi da različite unutarnje plohe elemenata ploče dođu u kontakt međusobno (npr. kad se dogodi izbijanje čepa pri čemu dolazi do trenja na bočnim površinama čepa i rupe gdje dolazi do kontakta ploha elemenata koje su na početku bile unutarnje i ne u dodiru).

2.2.7. Parametri materijala

Parametri materijala i vrijednosti fizikalnih veličina materijala korištenih u simulacijama prikazani su u tablicama 2 i 3 . Radi se o čeliku Weldox 460 E korištenim za ploče i Arne tool steel čeliku korištenim za projektile. Razloga promjene parametara u tablici 2 te njihov utjecaj objašnjen je u poglavlju 2.2.8 te je vidljiv na slici 22.

Tablica 2. Parametri za Weldox 460 E [4]

WELDOX 460 E							
E, [N/mm^2]	ν, [-]	χ, [-]	c_p, [J/K]	ρ, [kg/m^3]	$T_{melt.}$, [K]	T_0, [K]	$\dot{\varepsilon_0}$, [s^{-1}]
200000	0,33	0,9	452	7850	1800	293	$5 \cdot 10^{-4}$
A, [N/mm^2]	B, [N/mm^2]	n	C	m			
490	807	0,73	0,012	0,94			
	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5		
Preliminarni:	0,0705	1,732	-0,54	-0,0123	0		
Promijenjeni:	-5,0388	6,6198	-0,774	-0,034	0		

Tablica 3. Parametri za Arne tool steel [4]

Arne tool steel					
ρ, [kg/m^3]	ν, [-]	E, [N/mm^2]	σ_T, [N/mm^2]	E_p, [N/mm^2]	ε_f, m/m
7850	0,33	204000	1900	15000	0,0215

2.2.8. Validacija materijalnog modela ploče

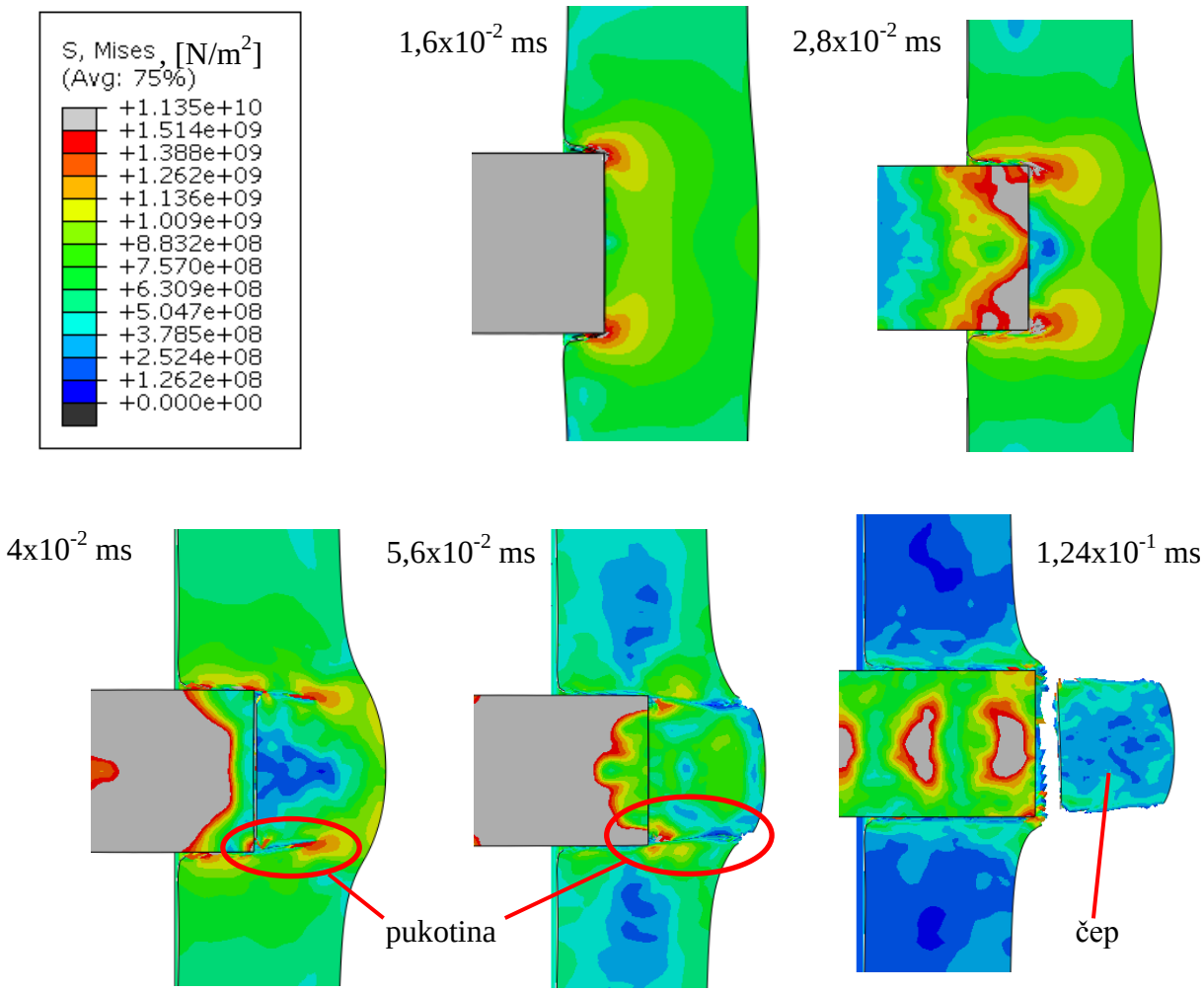
Validacija materijalnog modela ploče napravljena je u odnosu na eksperimentalne rezultate iz [4], točnije, za niz eksperimentalnih slučajeva izvedene su simulacije i dobivene balističke krivulje su uspoređene. Balističke krivulje su krivulje ovisnosti izlazne brzine projektila o ulaznoj. Eksperimentalni slučajevi razlikovali su se prema brzini udara projektila u ploču. Validacija modela odvijala se u više faza, paralelno sa poboljšavanjem modela i simulacija. Tako su prvotne simulacije izvedene sa projektilom koji je bio samo elastično deformabilan, a kasnije i plastično deformabilan. Simulacije su izvođene u *software-u* Abaqus/Explicit

korištenjem ugrađenog eksplicitnog računalnog kôda za integraciju sustava diferencijalnih jednadžbi gibanja ([7], poglavlje 2.4.5. *Abaqus Theory Manual*). Osim svojstava projektila, promijenjeni su i preliminarni parametri $D_{1\text{-}3}$ dobiveni ispitivanjem, radi korištenja parametara koji su se pokazali boljim u [4]. Problematika validacije modela svela se na modificiranje parametra D_4 kriterija inicijacije oštećenja, kako bi se postigla bolja korelacija s eksperimentima. Prvo je pokušano da pojedinačni rezultati budu barem unutar ±20%, a poželjno i unutar 10%. Nadalje, nakon dobivanja nekoliko rezultata, cilj je bio postići sličnost balističke krivulje na cijelom rasponu brzina za koje postoje rezultati. Na kraju, validacija je proširena na cijeli spektar balističkih krivulja za različite debljine ploča. Tako je parametar D_4 postavljen na konačnu vrijednost od -0,034 za slučajeve simulacija sa plastično deformabilnim projektilom.

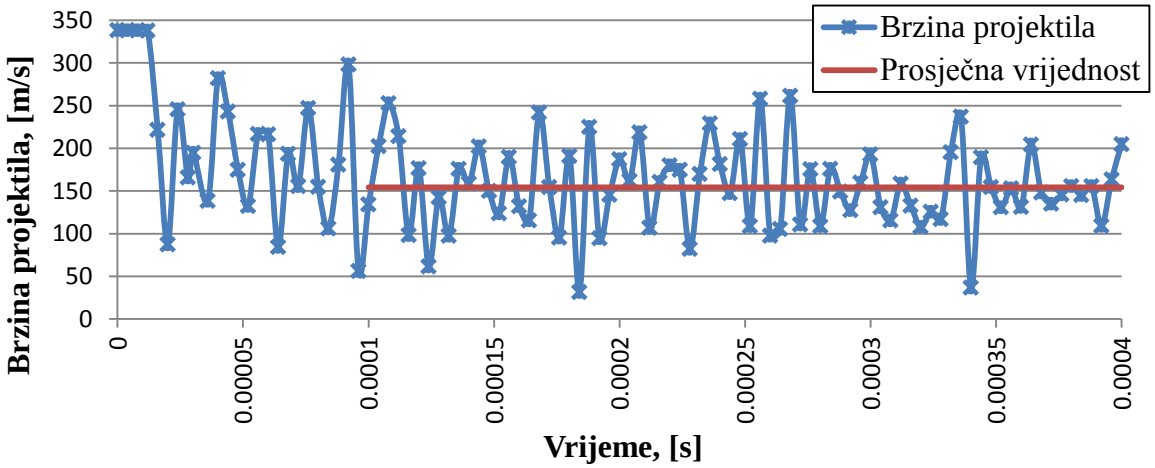
Pri simulacijama (kao i kod eksperimenata) s projektilima s ravnim vrhom je primjećena pojava formiranja (crvenom linijom je zaokružena propagacija pukotine na slici 17) i izbijanja čepa pri udarima (slika 17).

Na slici 17 prikazana je raspodjela naprezanja u ploči tijekom probijanja elastičnog projektila s ravnim vrhom s početnom brzinom od 338 m/s kroz ploču debljine 20 mm. Ta simulacija probijanja je samo jedna u nizu izvedenih simulacija sa elastičnim projektilom. Simulacije su se razlikovale po početnoj brzini projektila te debljini ploča. Svaka simulacija izvedena je sa kombinacijom ta dva parametra, a rezultat jedne simulacije je izlazna brzina projektila.

Izlazna brzina projektila zapravo je prosječna vrijednost brzina u intervalu nakon probijanja (slika 18). Prosječna vrijednost uzima se iz razloga što je brzina praćena u točki na kraju elastičnog projektila zbog čega postoje oscilacije brzine.

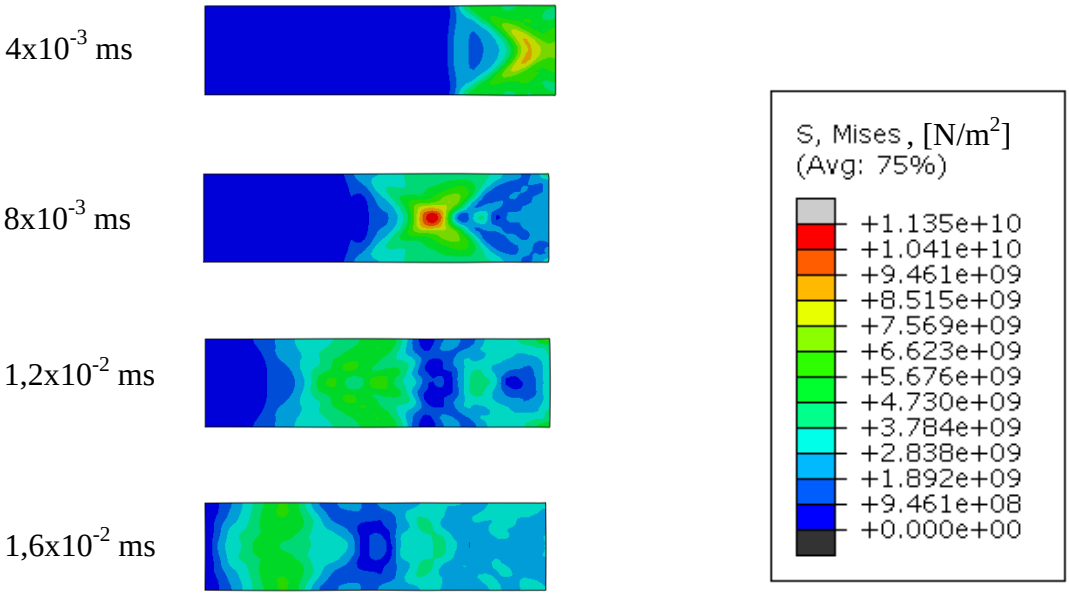


Slika 17. Naprezanja tijekom probijanja ploče debljine 20 mm elastično deformabilnim projektilom početne brzine 338 m/s



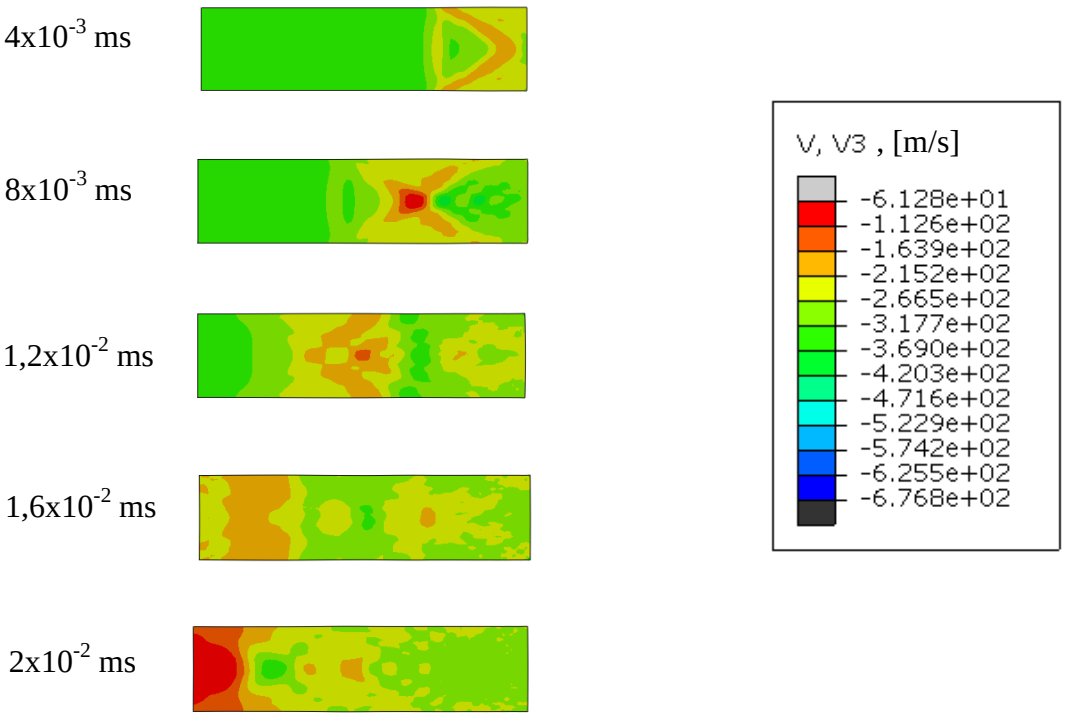
Slika 18. Brzina točke na projektilu tijekom udara elastično deformabilnog projektila s početnom brzinom 338 m/s u ploču debljine 20 mm

Kako se kod udara radi o dinamičkom događaju, kroz projektil se šire valovi naprezanja (slika 19) i on se deformira u uzdužnom smjeru.



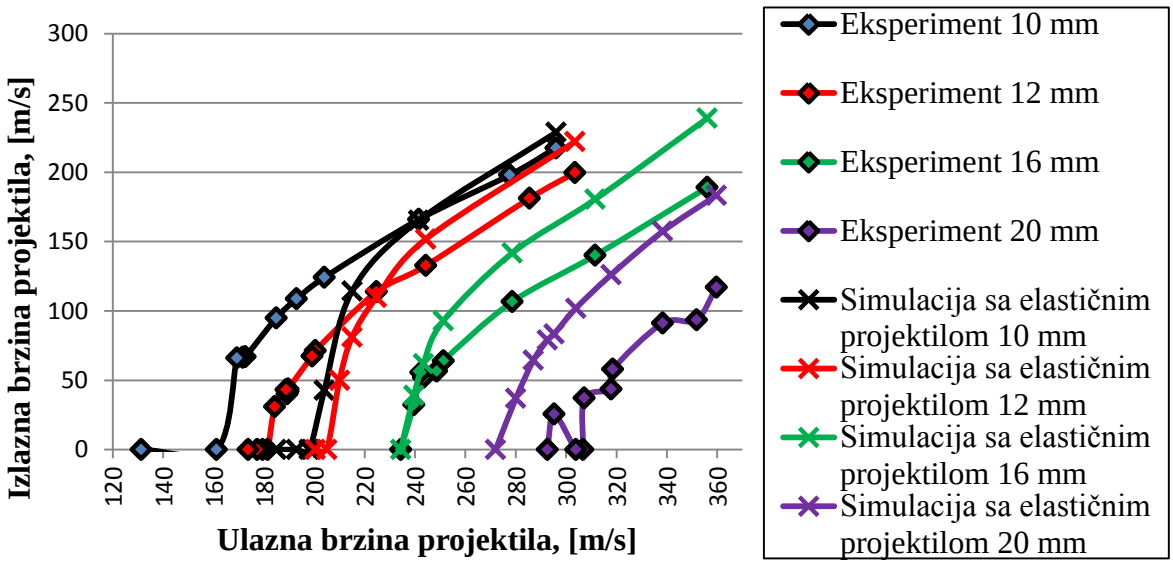
Slika 19. Prolazak početnog vala naprezanja kroz elastični projektil (u metu udara desno)

Osim vala naprezanja kroz projektil na isti način šire i valovi brzine (slika 20), s razlikom što ti valovi prema kraju projektila smanjuju brzinu, za razliku od naprezanja koje se povećavaju. Ti valovi uzrokuju oscilacije brzine na kraju projektila (slika 18).



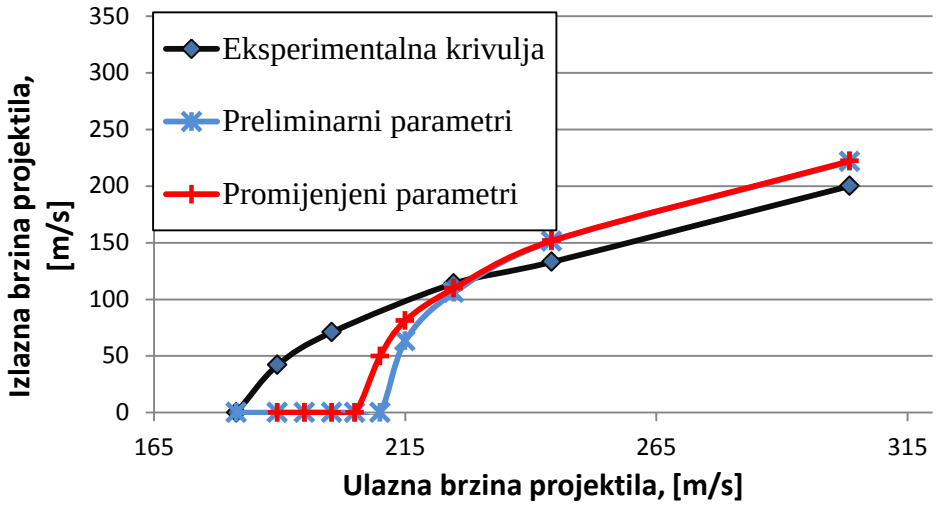
Slika 20. Početni val brzine u smjeru osi *Z* kroz elastični projektil (u metu udara desno)

Rezultati niza simulacija za debljine prikazani su na slici 21 u obliku balističkih krivulja. Balističke krivulje opisuju ovisnost izlazne brzine projektila o ulaznoj brzini za slučajeve probijanja ploče određene debljine. One se dobivaju interpolacijom rezultata pojedinačnih simulacija (točaka na grafu), a u slučaju eksperimentalnih krivulja interpolacijom rezultata pojedinačnih ispaljivanja projektila. Simulacije su izvođene tako da su ulazne brzine projektila bile jednake ulaznim brzinama projektila izmjerenim pri eksperimentima kako bi simulacije i eksperimenti mogli biti uspoređivani i direktno za pojedine slučajeve. To je vidljivo na slici 21, gdje se vidi da parovi rezultata simulacija i eksperimenata imaju istu *X* koordinatu (leže na istom okomitom pravcu). Iznimke od toga su rezultati simulacija sa ulaznim brzinama oko granične brzine probijanja koji su korišteni za točnije određivanje granične brzine probijanja (slika 21). Za određivanje balističkih krivulja za simulacije sa elastično deformabilnim projektilom provedeno je 30 simulacija. Prosječno trajanje simulacije je bilo oko 30 minuta, a probijanje se odvilo u vremenu od $4x10^{-1}$ ms do $8x10^{-1}$ ms (simulacije s ulaznom brzinom projektila bliže graničnoj brzini probijanja trajale su dulje).



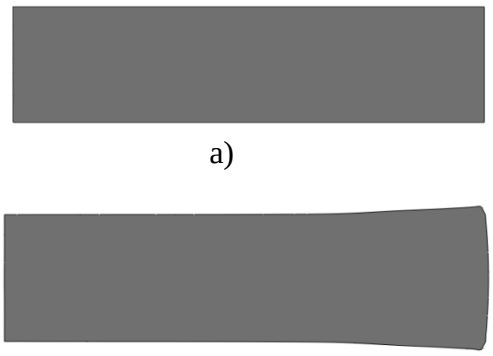
Slika 21. Usporedba balističkih krivulja za simulacije s elastičnim projektilom

Valja napomenuti kako su simulacije sa elastično deformabilnim projektilom provedene sa promijenjenim parametrima iz tablice 2. Na primjeru balističke krivulje za ploču debljine 12 mm (slika 22) može se vidjeti utjecaj promijenjenih parametara na balističku krivulju u odnosu na preliminarne podatke iz tablice 2. Područje, gdje je balistička krivulja bolja, je područje oko granične brzine probijanja, veličine koja je možda i najbitniji konstrukcijski podatak.



Slika 22. Utjecaj promijenjenih parametara na balističku krivulju

Uključivanjem mogućnosti plastičnog deformiranja projektila, rezultati simulacija su se promijenili. Analiza tijeka simulacije i rezultata je pokazala da je plastično deformiranje projektila dosta bitno, jer se javlja dodatni mehanizam usporavanja projektila. Naime, prilikom početnog stadija udara projektila u ploču (prije nego što ploča popusti i javi se pukotina), on se plastično deformira pri vrhu, na način da mu se vrh spljošti i poprimi veći promjer od početnog (slika 23):

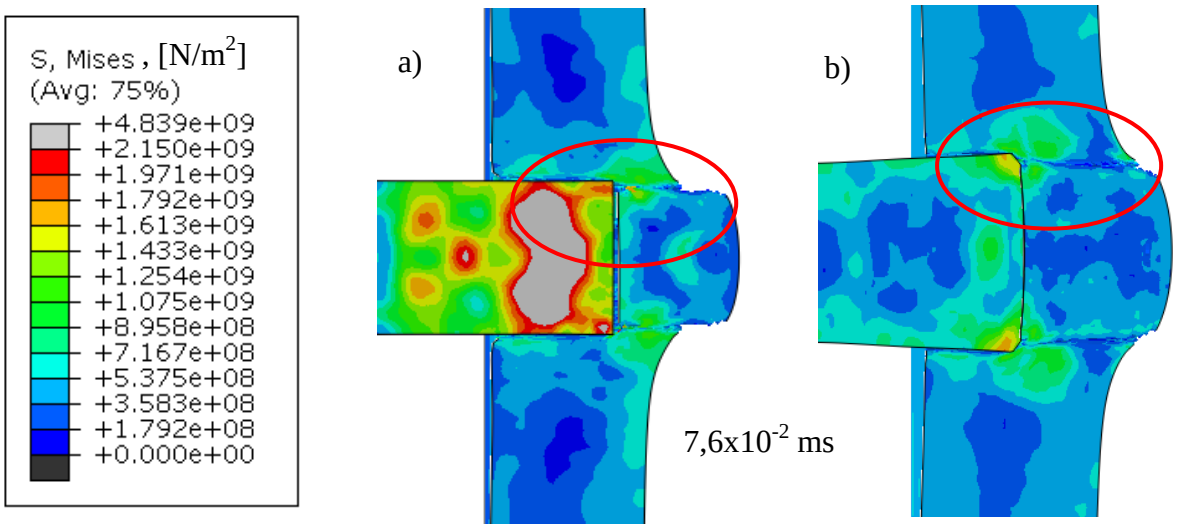


a)

b)

Slika 23. a) - elastično deformabilan projektil ; b) - plastično deformabilan projektil (vrh projektila u kontaktu sa pločom je desno)

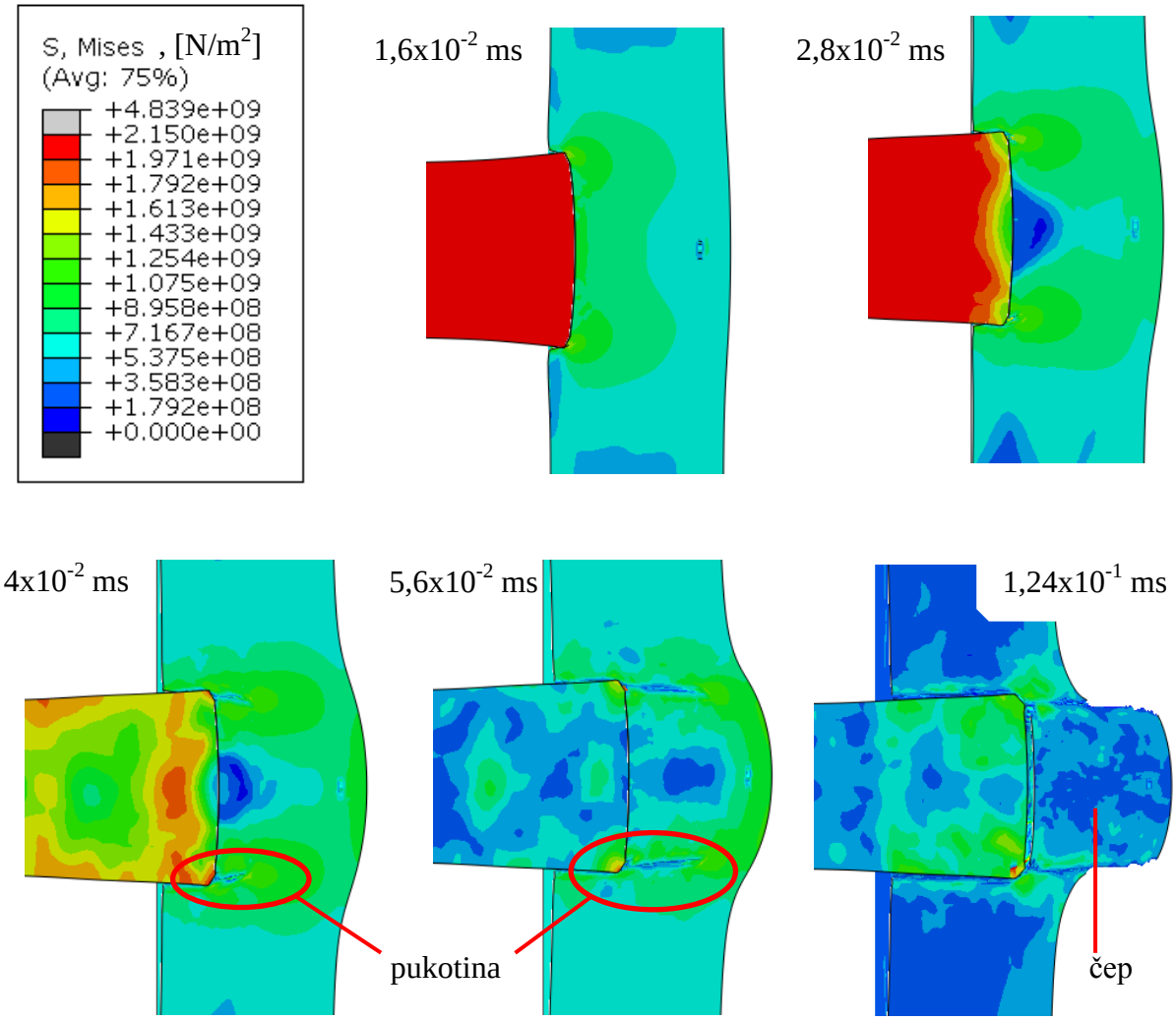
Nakon toga ploča počinje popuštati usred smičnog naprezanja pri čemu se formira čep. Promjer tog čepa u ovim simulacijama je uglavnom manji ili jednak promjeru nedeformiranog projektila. S obzirom na to da nakon izbijanja čepa manjeg promjera u ploči ostaje rupa promjera manjeg od promjera vrha plastično deformiranog projektila (slika 24), dolazi do dodatnog otpora pri prolasku projektila kroz ploču i usporavanja projektila, jer projektil dio svoje kinetičke energije troši na proširivanje rupe (slika 24).



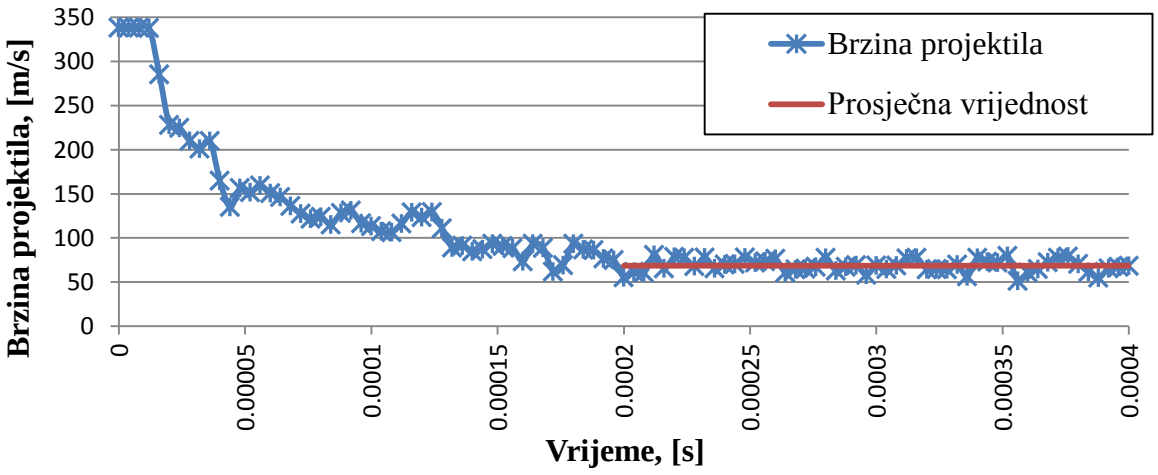
Slika 24. Proširivanje rupe u ploči debljine 20 mm - plastično nedeformabilan (a) i plastično deformabilan (b) projektil sa ulaznom brzinom od 338 m/s

Naprezanja tijekom probijanja ploče debljine 20 mm plastično deformabilnim projektilom s početnom brzinom od 338 m/s prikazano je na slici 25. I kod ovih simulacija javlja se pojava izbijanja čepa, ali u odnosu na simulacije sa elastično deformabilnim projektilom, projektil se izbija kasnije zbog već spomenutog mehanizma dodatnog usporavanja.

Brzina projektila tijekom simulacije prikazana je na slici 26. Moguće je primijetiti kako i ovdje postoje oscilacije brzine kao i na slici 18, no one su znatno manje što je posljedica plastičnosti projektila.



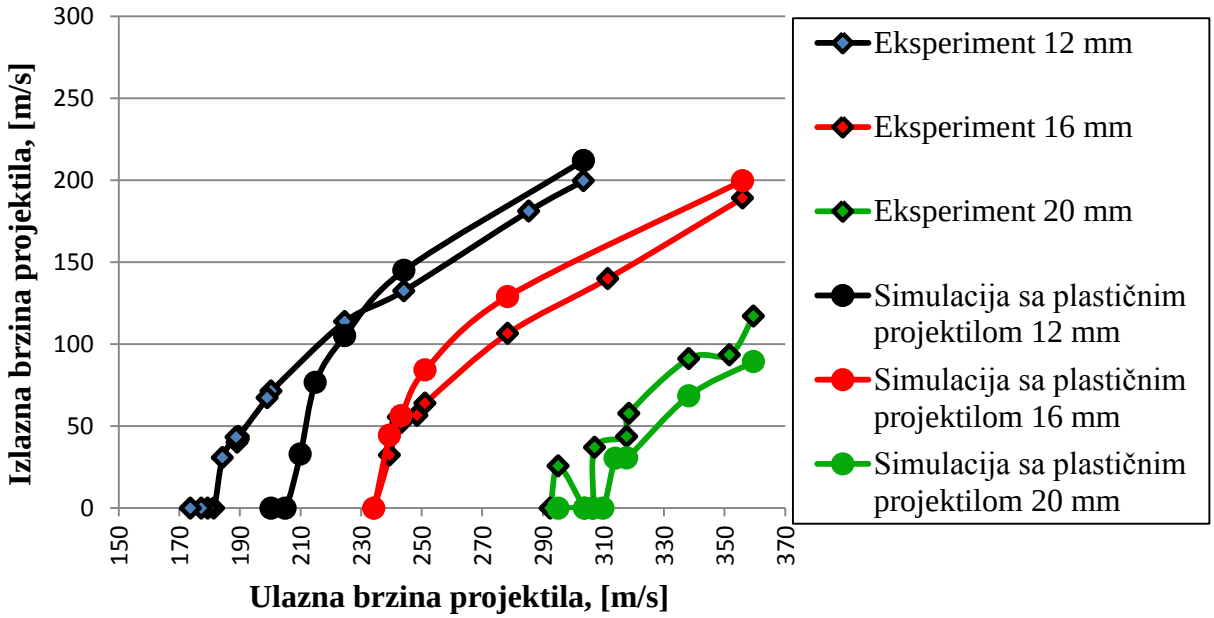
Slika 25. Naprezanja tijekom probijanja ploče debljine 20 mm plastično deformabilnim projektilom početne brzine 338 m/s



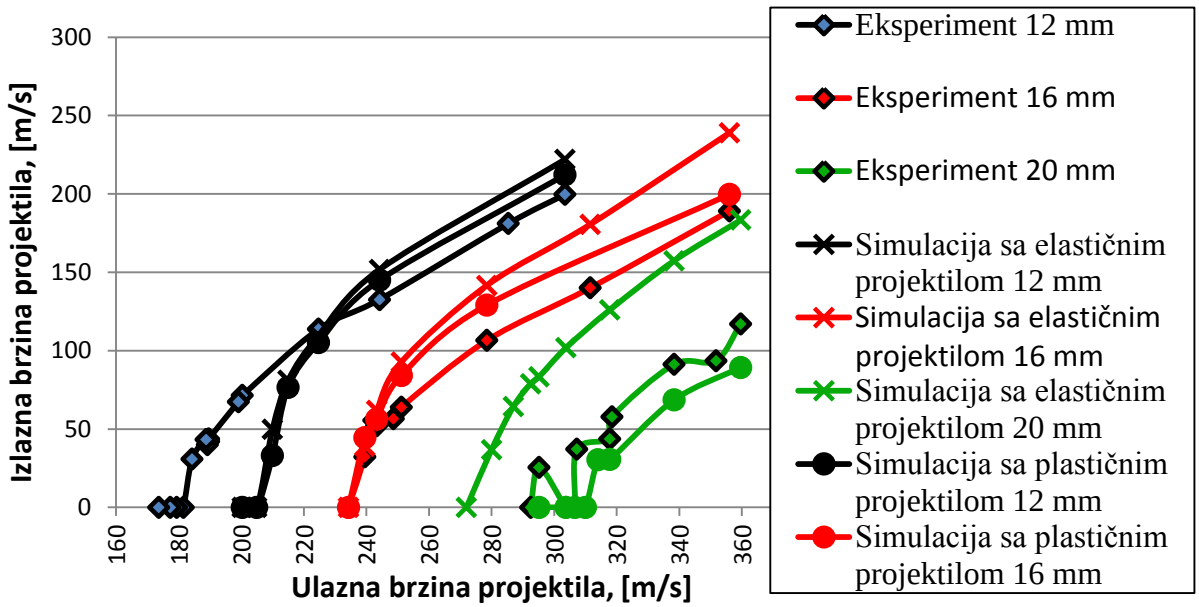
Slika 26. Brzina točke na projektilu tijekom udara plastično deformabilnog projektila s početnom brzinom 338 m/s u ploču debljine 20 mm

I za plastično deformabilan projektil proveden je niz simulacija (dvadeset i jedna) u kojima je varirana ulazna brzina projektila i postavljana tako da bude jednaka ulaznim brzinama projektila ispaljenih prilikom eksperimenata. Pomoću tih numeričkih rezultata dobivene su balističke krivulje za simulacije sa plastično deformabilnim projektilom za debljine ploča od 12 mm, 16 mm i 20 mm (slika 27). Simulacije su trajale prosječno oko sat vremena, a sami udari su trajali od $4x10^{-1}$ ms do 1,2 ms.

Zbog dodatnog mehanizma usporavanja, najveća razlika u balističkim krivuljama, dobivenim pomoću simulacija sa elastično deformabilnim i plastično deformabilnim projektilom, je za ploču debljine 20 mm, jer u tom slučaju za proširivanje rupe treba više vremena tijekom kojeg se i projektil dulje usporava. To usporavanje na balističku krivulju utječe na način da ju pomiče udesno, što je vidljivo na slici 28. Osim pomicanja balističke krivulje za ploču od 20 mm udesno, utjecaj plastičnog deformiranja projektila vidljiv je i na balističkoj krivulji za ploču od 16 mm, koja je sličnija eksperimentalnoj krivulji za ploču od 16 mm iznad 280 m/s. Vidljivo je iz slike 28 da su balističke krivulje za simulacije pomoću plastično deformabilnog projektila bliže eksperimentalnim od balističkih krivulja za simulacije pomoću elastično deformabilnog projektila. Stoga se može zaključiti da plastična deformabilnost projektila poboljšava rezultate tj. omogućava bolju validaciju materijalnog modela.

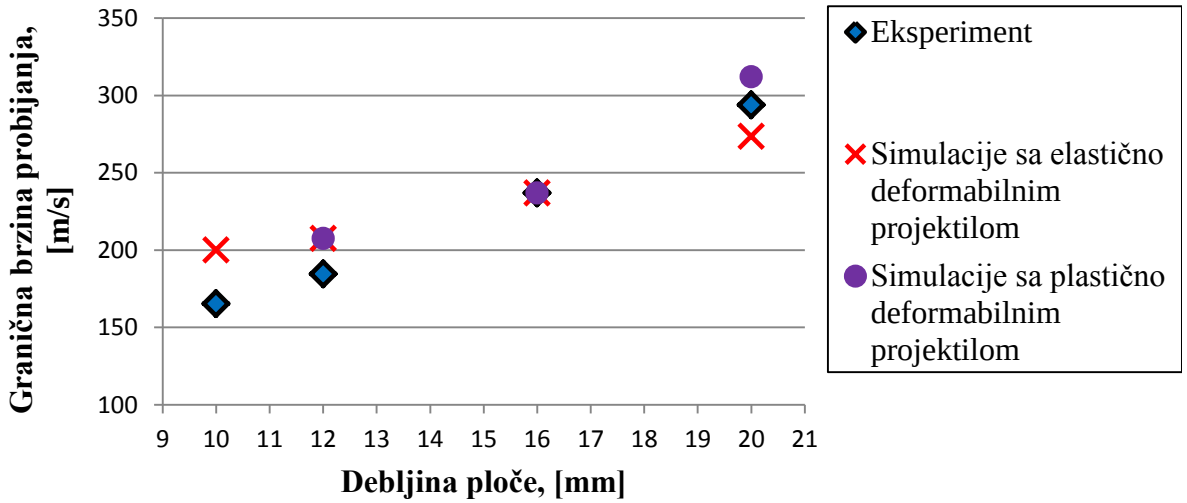


Slika 27. Usporedba balističkih krivulja za simulacije sa plastično deformabilnim projektilom



Ovakvi rezultati su dobri s obzirom na korištena pojednostavljenja i vrlo složenu fizikalnu pojavu koja se proučava u ovom radu te se materijalni model može smatrati validiranim. Najbolje poklapanje sa eksperimentalnom krivuljom pokazuje balistička krivulja za ploču debljine 16 mm (slika 28), stoga je u kasnijim simulacijama korištena pri određivanju utjecaja kuta udara na balističku krivulju.

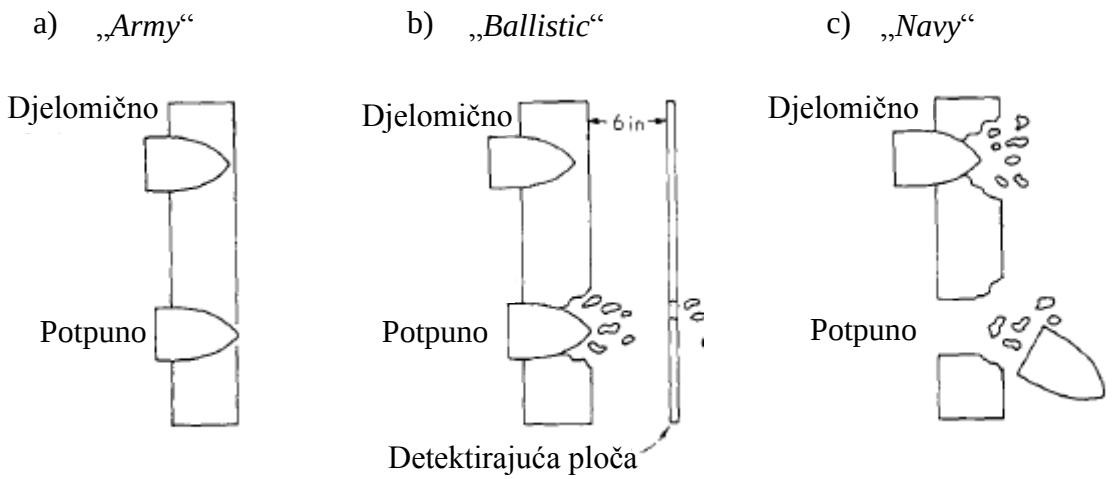
Granična brzina probijanja u ovisnosti o debljini ploče prikazana je na slici 29.



Slika 29. Ovisnost granične brzine probijanja o debljini ploče

Prema slici 29, može se donijeti zaljučak kako granična brzina probijanja raste sa povećanjem debljine te kako ta ovisnost nije linearna, nego blago progresivno raste.

Valja spomenuti kako postoji više načina kako se granična brzina probijanja može definirati. Kriteriji se razlikuju prema tome koliku razinu probijanja dozvoljavaju. Slika 30 vizualno opisuje razliku između kriterija probijanja.



Slika 30. Kriteriji probijanja [5]

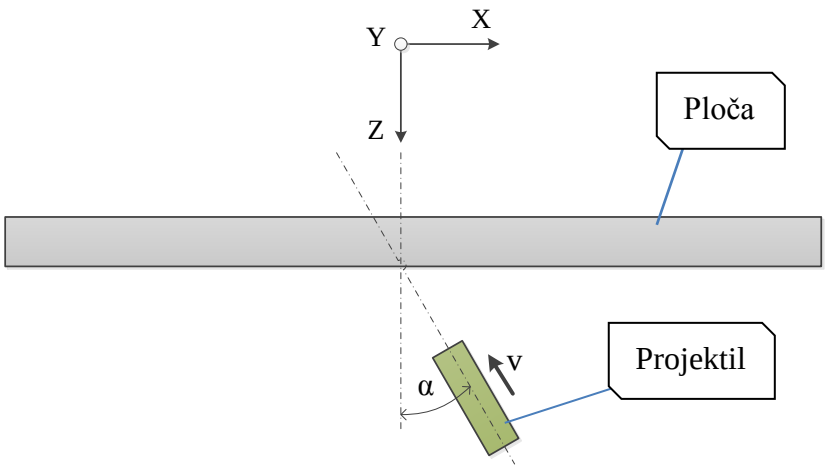
Kriterij a), u literaturi poznat kao „*army*“ kriterij, definira slučaj udara kao probijanje ako kroz ploču nakon udara može proći zraka svjetlosti [5]. Kriterij b), u literaturi poznat kao „*ballistic*“ kriterij, definira slučaj kao probijanje, ukoliko bilo koji dio ploče ili projektila probije aluminijsku detektirajuću ploču (engl. *witness plate*) lociranu iza ploče na udaljenosti od 152,4 mm (6 inča) [5]. Kriterij c), u literaturi poznat kao „*navy*“ kriterij, definira slučaj kao probijanje, ukoliko barem polovina projektila prođe kroz metu [5]. Prema tim definicijama, granična brzina probijanja sa slike 29 najbliža je kriteriju c). Naime, u ovim simulacijama naglasak je bio na uspoređivanju balističkih krivulja pa su pojave poput uglavljivanja projektila u ploču (koje su u nekim slučajevima primijećene) uzimane kao slučaj neprobijanja (tj. izlazna brzina je uzimana kao 0) bez obzira koliko projektila je prošlo sredinu ploče. Takva granična brzina probijanja još je konzervativnija od nabrojanih kriterija, što gledano s konstrukcijske strane nije dobro, jer ne ide na stranu sigurnosti. Problem kod toga je bio što u literaturi ([4]) postupak određivanja granične brzine probijanja nije dovoljno opisan tj. nejasno je koji kriterij primjenjuju pa je ovakav način jedini bio logičan iz brojčanih rezultata koji postoje.

3. NUMERIČKE SIMULACIJE – ODREĐIVANJE UTJECAJA NA PROBIJANJE

Koristeći postojeće konfiguracije i materijalni model ploče i projektila (plastično deformabilan), izveden je niz simulacija u kojima su ispitani osnovni utjecaji na probijanje – utjecaj kuta udara, utjecaj vrha projektila i utjecaj konfiguracije mete.

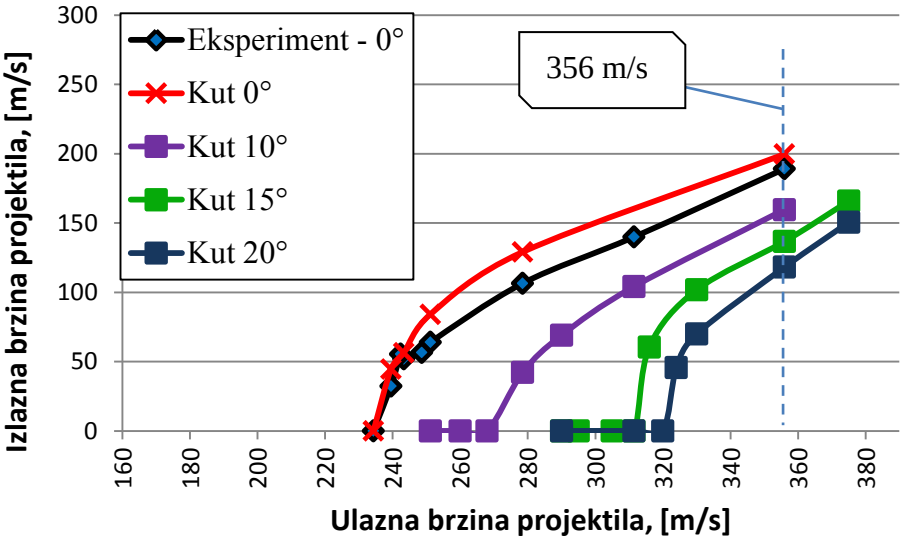
3.1. Utjecaj kuta udara

Utjecaj kuta pod kojim projektil udara u ploču na balističku krivulju ispitan je pomoću niza simulacija (21 simulacija; prosječno trajanje 5 sati; vrijeme probijanja 1,5 ms) u kojima je projektil postavljen u položaj gdje mu je uzdužna os pod određenim kutem na normalu ploče (slika 31). S obzirom da mu tada uzdužna os u smjeru koje se on giba nije paralelna ili okomita na osi koordinatnog sustava, zadane su mu odgovarajuće komponente brzine ovisno o kutu udara (α) i magnitudi brzine kojom projektil putuje prije udara.



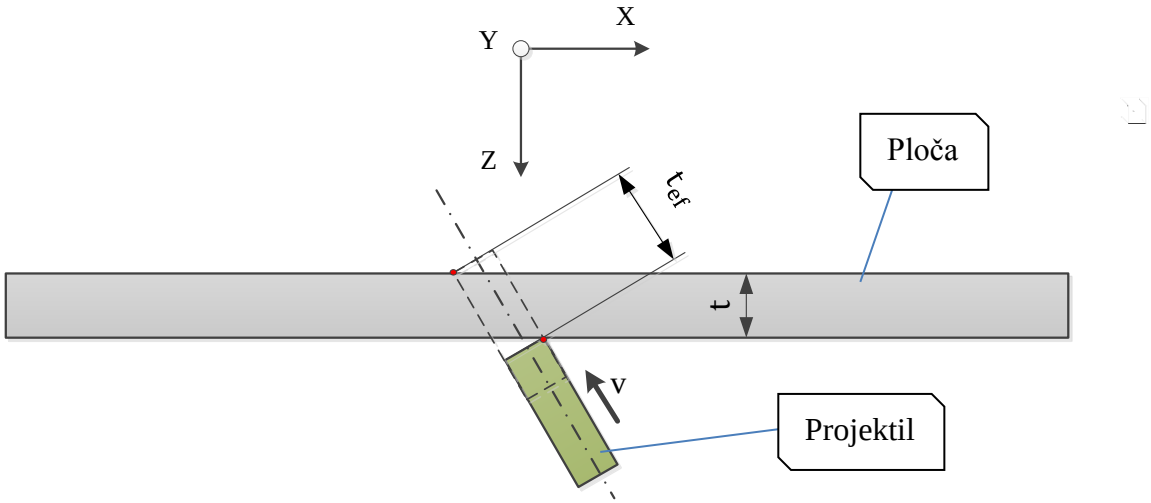
Slika 31. Udar pod kutem – kut udara i koordinatni sustav

Kao što je i očekivano, kut udara projektila utječe na balističku krivulju na način da je pomiče udesno (slika 32). To znači da granična brzina probijanja raste sa povećanjem kuta udara te da se projektil za određenu brzinu kreće sporije nakon probijanja sa povećanjem kuta udara projektila (npr. za ulaznu brzinu od 356 m/s na slici 32). Sve simulacije izvedene su na ploči debljine 16 mm, čija je balistička krivulja dobivena simulacijama najsličnija eksperimentalnoj balističkoj krivulji (slike 27 i 28).



Slika 32. Usporedba balističkih krivulja za različite kuteve udara

Fizikalno objašnjenje ovakve pojave je jednostavno, sa povećanjem kuta udara povećava se i efektivna debljina ploče t_{ef} (slika 33) tj. udaljenost tijekom koje je projektil u interakciji sa pločom, pri čemu je projektil duže u kontaktu sa pločom te se više uspori.

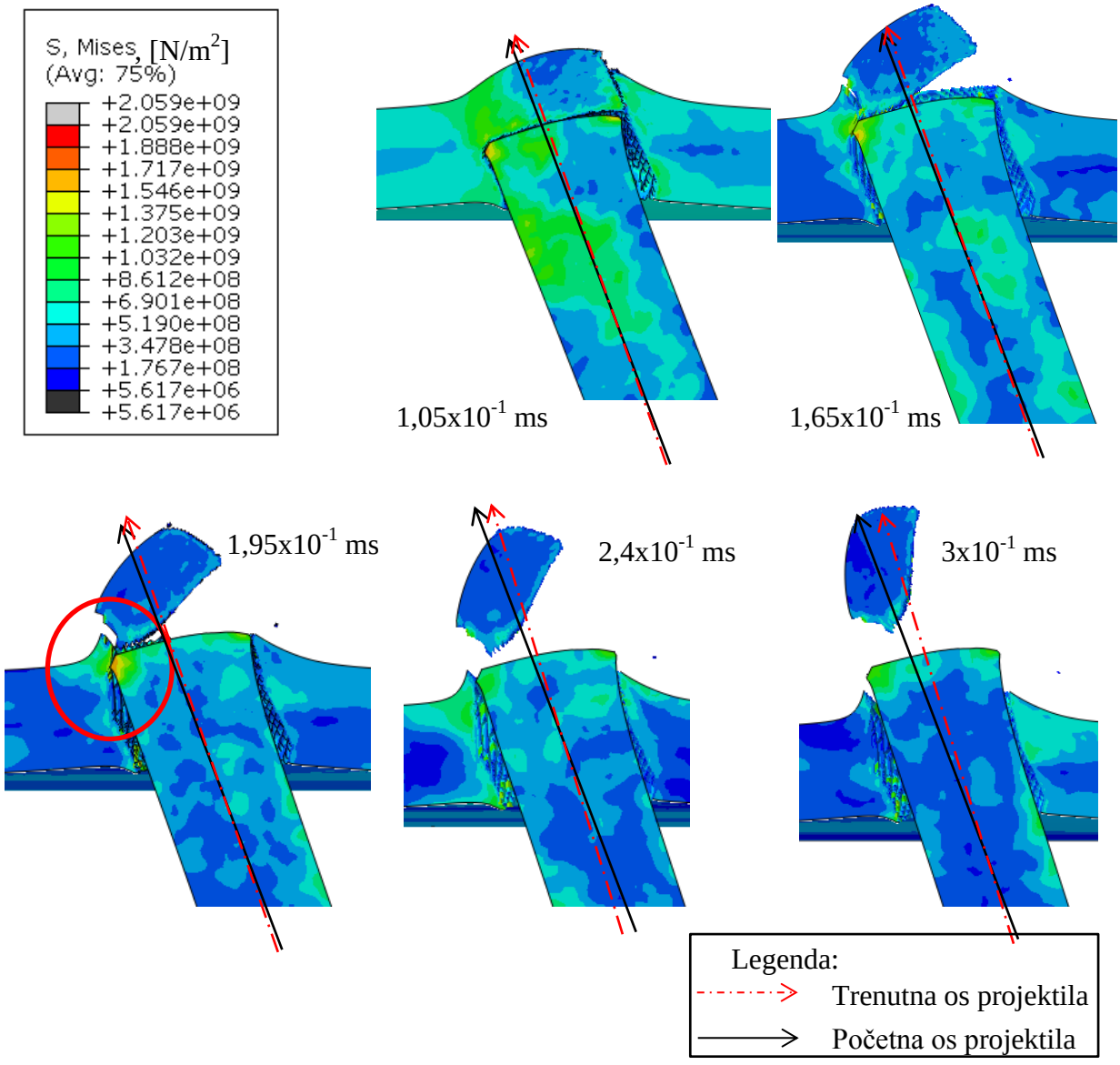


Slika 33. Efektivna debljina probijanja

Osim usporavanja projektila tj. pomicanja balističke krivulje udesno, mijenja se i kut uzdužne osi projektila u odnosu na normalu ploče pri izlasku. Kut izlaza redovito se smanjuje tj. projektil skreće prema normali na ploču. S obzirom da se projektil nakon probijanja ne kreće u smjeru neke od glavnih osi koordinatnog sustava, izlazna brzina određena je pomoću

komponenti u dva smjera – komponente brzine u smjeru normale na ploču (*Z*-os) i komponente okomite na normalu na ploču (*X*-os). Te komponente su dobivene uzimanjem prosječne vrijednosti brzine točaka na vrhu i kraju projektila kako bi se poništio utjecaj rotacije projektila oko osi okomite na uzdužnu os projektila (*Y*- os; treća os okomita i na druge dvije osi u čijim smjerovima se uzimaju komponente).

„Skretanje“ projektila tj. promjena kuta izlaska projektila događa se zbog toga što projektil pri probijanju tj. u zadnjim fazama formiranja čepa i u početnim trenucima gibanja neposredno nakon izbijanja čepa, ostaje u kontaktu sa pločom sa lijeve strane (slika 34). Pri tome ga taj kontakt usmjerava udesno i smanjuje izlazni kut projektila.

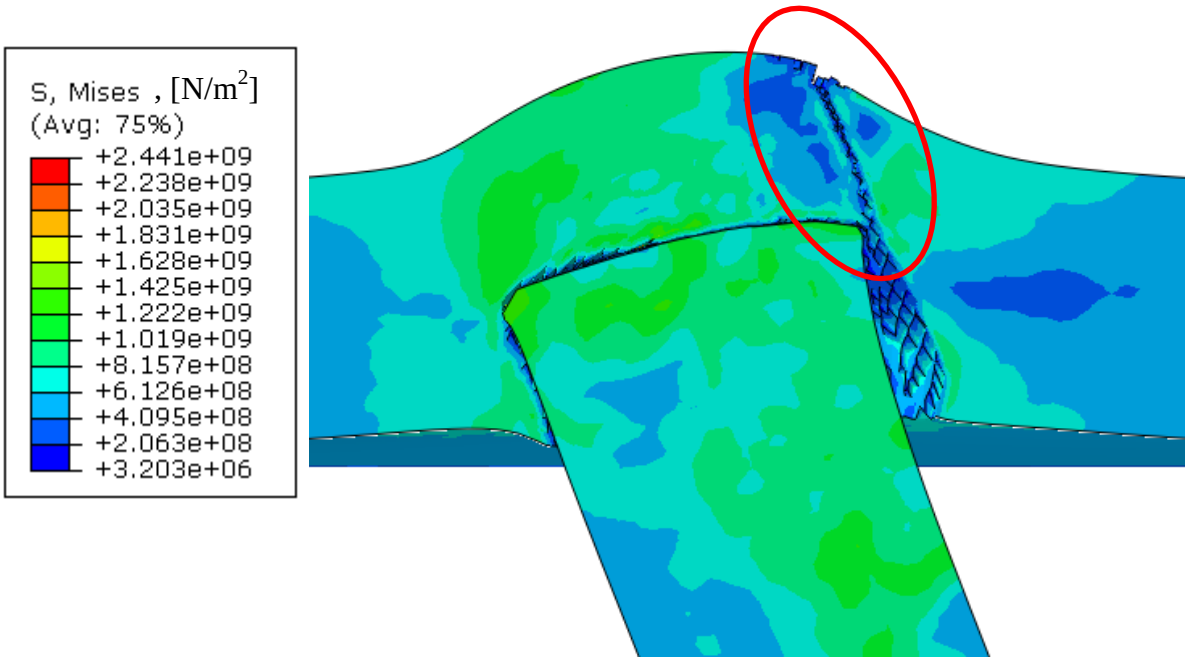


Slika 34. Naprezanje pri „skretanju“ projektila pri probijanju s ulaznom brzinom 330 m/s pod kutem od 20°

Slučaj probijanja prikazan na slici 34, slučaj je probijanja ploče debljine 16 mm projektilom sa ravnim vrhom pod kutem od 20° s početnom brzinom projektila od 330 m/s u smjeru uzdužne osi projektila.

„Skretanje“ projektila je u skladu sa literaturom ([3]), gdje autori navode da projektil može promijeniti smjer, uobičajeno prema normali na površinu mete.

I pri ovim simulacijama primijećena je pojava izbijanja čepa iz ploče. Formiranje čepa odvija se popuštanjem elemenata u smjeru paralelnom sa uzdužnom osi projektila (slika 35).



Slika 35. Smjer formiranja čepa kod udara pod kutem

U tablici 4 prikazani su rezultati simulacija za udare pod kutem.

Tablica 4. Rezultati simulacija sa variranjem kuta udara

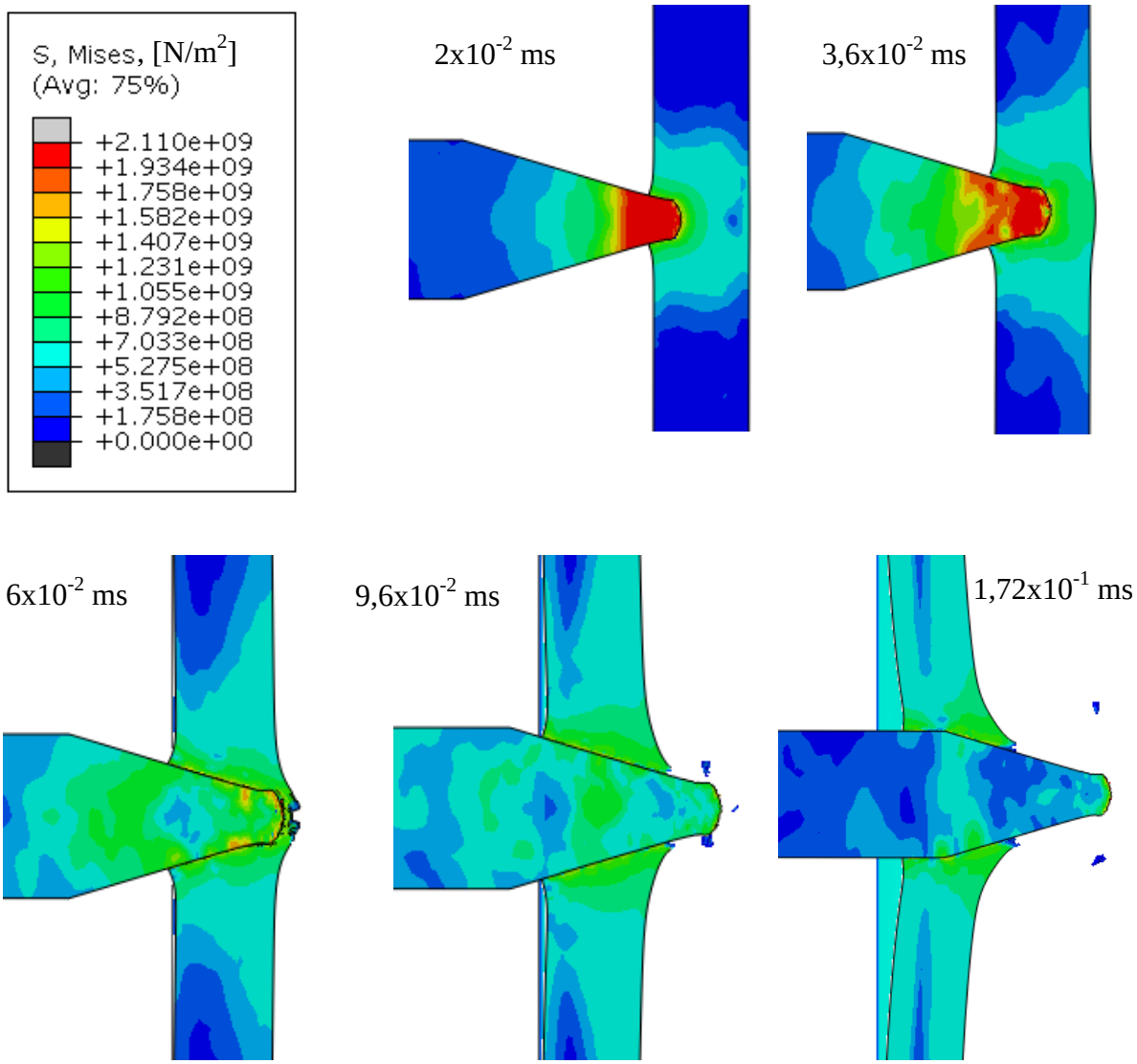
Kut ulaza:		Ulazna brzina, [m/s]	356	311,5	290	278,5	268
10°	Efektivna debljina:	Izlazna brzina, [m/s]	159,7	104,2	69	42,2	0
	18,82 mm	Kut izlaza, [°]	2,4	5,5	5,1	-2,5	-

15°		Ulazna brzina, [m/s]	375	356	330	316	311,5
	Efektivna debljina:	Izlazna brzina, [m/s]	165,8	136,7	101,8	60,6	0
	20,29 mm	Kut izlaza, [°]	8,2	7,8	10,8	10,6	-
20°		Ulazna brzina, [m/s]	375	356	330	324	311,5
	Efektivna debljina:	Izlazna brzina, [m/s]	150,5	118,2	69,9	45,7	0
	21,82 mm	Kut izlaza, [°]	12	12,6	18,6	14,1	-

3.2. Utjecaj vrha projektila

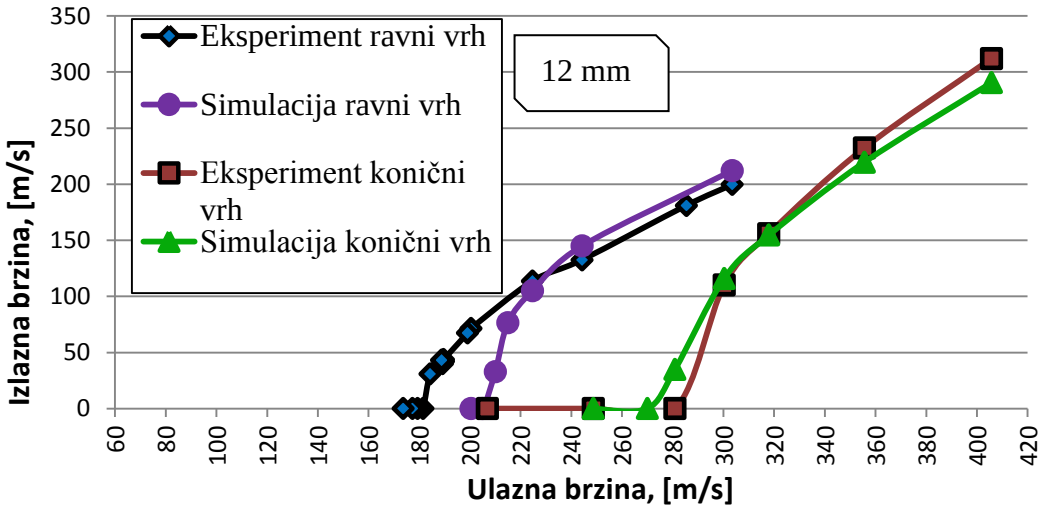
Realni projektili tj. penetratori kinetičkih projektila razlikuju se od dosadašnjeg projektila korištenog u simulacijama po geometriji. Ponajviše se geometrija razlikuje na vrhu tj. umjesto ravnog vrha, kinetički penetratori imaju približno konični vrh (oblik šiljka). Utjecaj vrha oblika projektila ispitan je u istoj konfiguraciji (isti parametri materijalnog modela, kut udara od 0°, debljina ploče 12 mm) kao i dosadašnje simulacije, sa iznimkom geometrije projektila. Geometrije projektila prikazane su na slici 10.

Provedeno je sedam analiza koje su prosječno trajale 6 sati, a probijanje se odvijalo u vremenu od $3x10^{-1}$ ms do $8x10^{-1}$ ms. Naprezanja tijekom udara za slučaj probijanja koničnog projektila s ulaznom brzinom od 300 m/s prikazana su na slici 36.



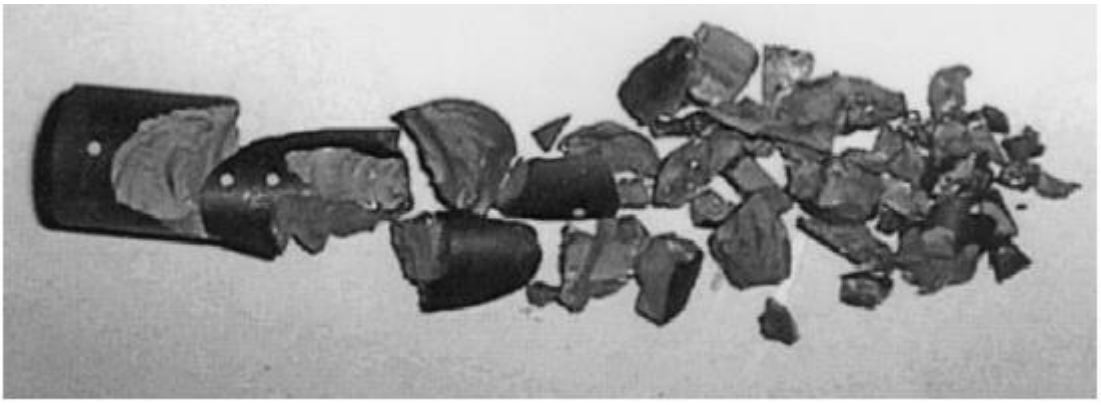
Slika 36. Naprezanje prilikom probijanja koničnog projektila s početnom brzinom 300 m/s u ploču debljine 16 mm

Prema rezultatima simulacija dobivena je balistička krivulja prikazana na slici 37. Vidljivo je iz slike 37 da je u ovom slučaju, u odnosu na balističku krivulju za projektil s ravnim vrhom, balistička krivulja za konični projektil pomaknuta udesno, što znači da konični projektil u ovom slučaju slabije probija ploču od projektila s ravnim vrhom.



Slika 37. Usporedba balističkih krivulja za različite oblike vrha projektila

To možda nije očekivano, s obzirom da su realni projektili tj. penetratori projektila svi „šiljasti“, ali razlog njihove uporabe leži u tome što ipak bolje probijaju deblje mete od projektila s ravnim vrhom. Primijećeno je i u [4] da se kod većih debljina ploča (konkretno 25 mm i 30 mm) projektili s ravnim vrhom raspadaju pri udaru (slika 38), uslijed velikog početnog otpora ploče i težeg formiranja čepa.

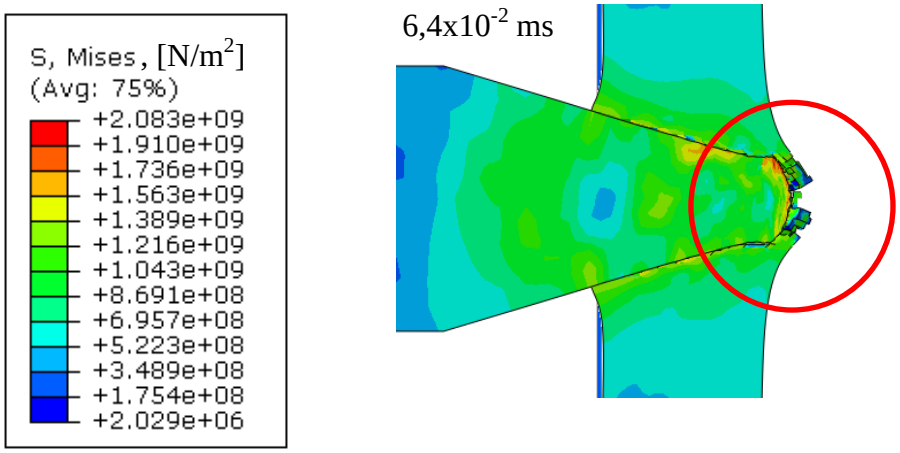


Slika 38. Raspadnuti projektil s ravnim vrhom nakon udara u ploču debljine 30 mm [4]

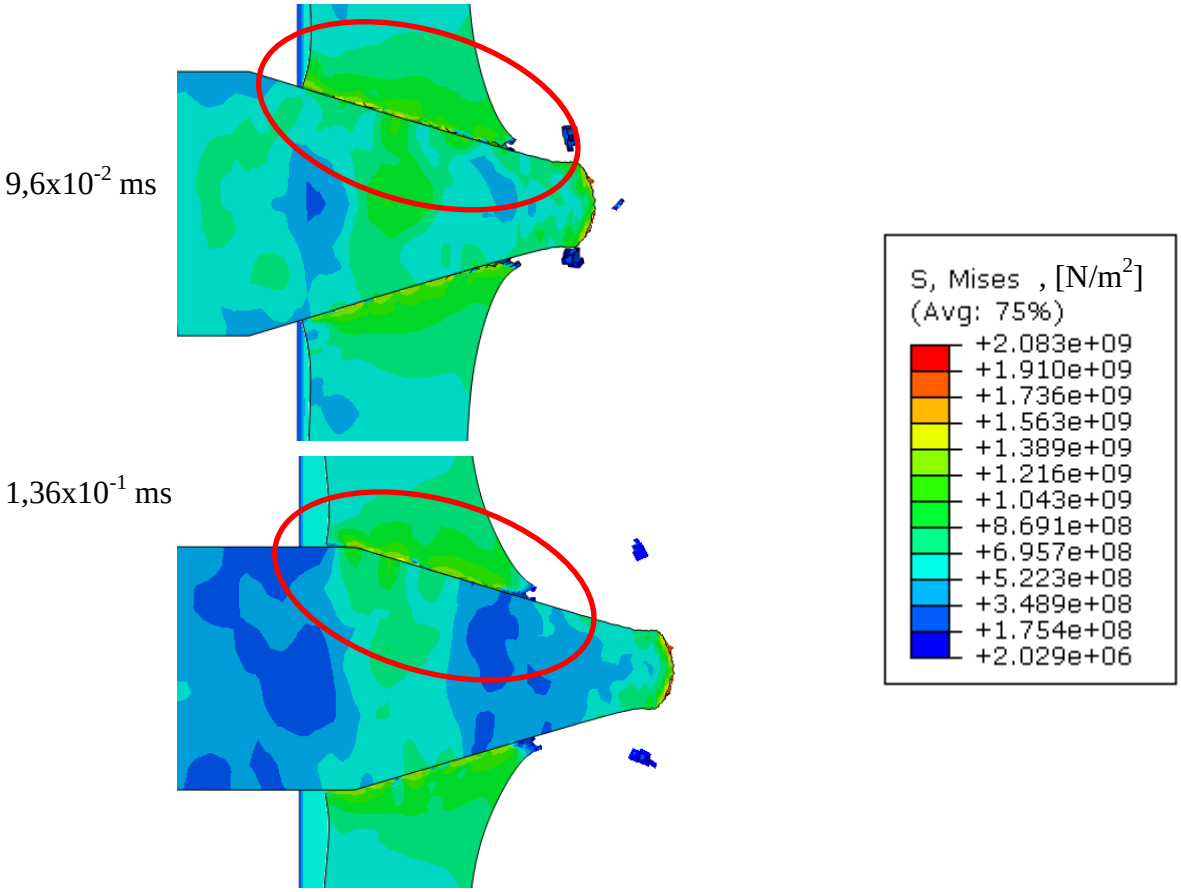
Samo poklapanje balističkih krivulja (eksperimentalne i krivulje dobivene simulacijama) je dobro, ali nažalost, za ostale debljine ploča (osim 12 mm) ne postoje podaci pa se ne mogu donijeti zaključci o ponašanju materijalnog modela za udare projektila sa koničnim vrhom.

Pomaknutost balističke krivulje udesno povezano je sa mehanizmom probijanja – kod projektila sa ravnim vrhom, projektil probija na način da stvara čep i nakon izbijanja čepa

usporava se eventualno pri proširivanju rupe od strane deformiranog vrha, a kod projektila sa koničnim vrhom ne izbija se čep već projektil svojim vrhom prvo probija ploču (slika 39) i rupu širi s koničnim vrhom pri čemu dolazi do većeg usporavanja projektila (slika 40).

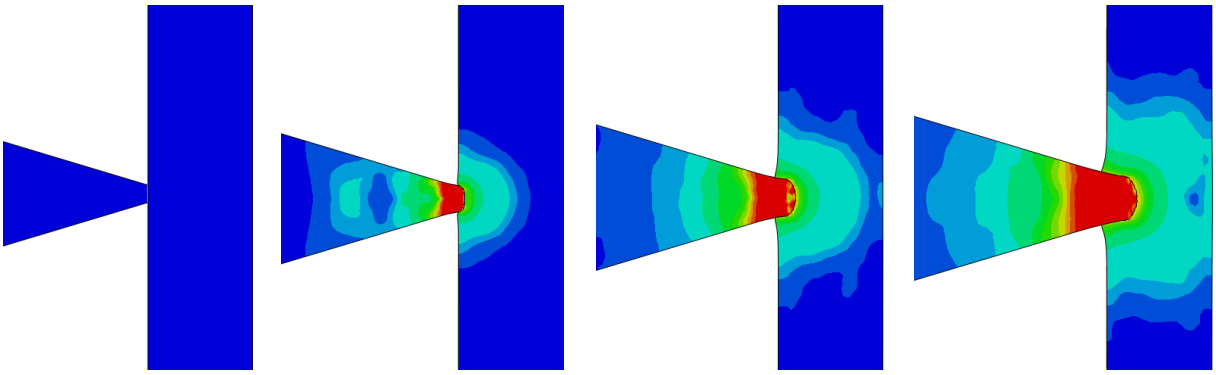


Slika 39. Mjesto probijanja stražnje površine kod probijanja ploče debljine 16 mm od strane koničnog pojektila sa ulaznom brzinom od 300 m/s



Slika 40. Proširivanje rupe kod probijanja koničnog projektila brzinom od 300 m/s u ploču debljine 16 mm

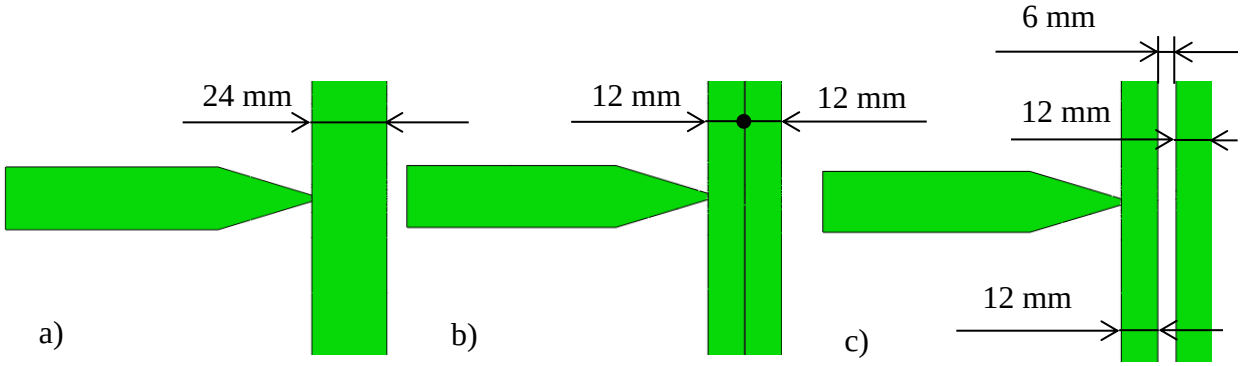
Kod udara projektila s koničnim vrhom također je primijećeno „zatupljivanje“ vrha projektila tj. plastična deformacija vrha projektila prikazano na slici 41.



Slika 41. Naprezanje pri „zatupljivanju“ vrha koničnog projektila s ulaznom brzinom od 300 m/s (za skalu boja – vidi sliku 40)

3.3. Utjecaj konfiguracije ploča

Kako se u stvarnosti nelijevane izvedbe oklopa (npr. zavarene) ne izvode iz homogenih ploča velikih debljina, nego iz više slojeva ploča, bitno je ispitati utjecaj konfiguracija na probojnost. Iz tog razloga izvedene su simulacije (tri simulacije, u trajanju od 48 sati svaka, udara u ploče različitih konfiguracija – homogena ploča debljine 24 mm (slika 42 a), višeslojna konfiguracija od dvije ploče debljine 12 mm svaka bez razmaka između njih (slika 42 b) te višeslojna konfiguracija od dvije ploče debljine 12 mm svaka sa razmakom od 6 mm između njih (slika 42 c).

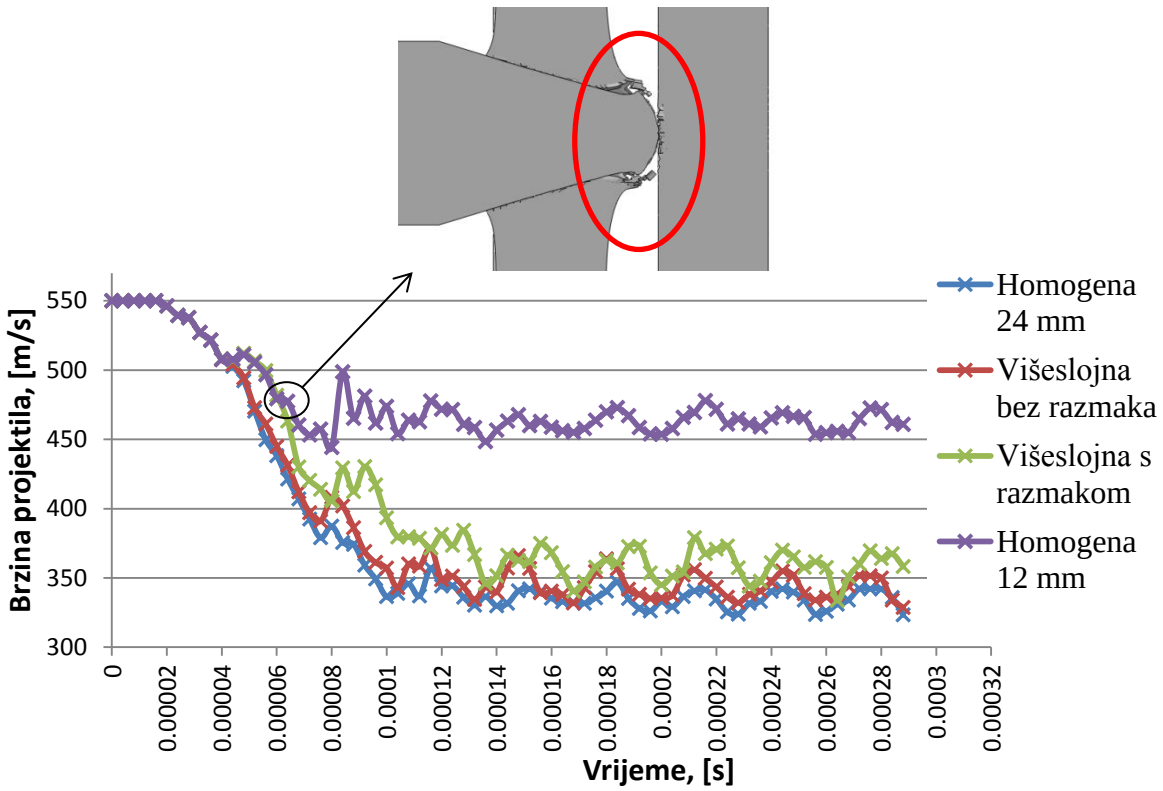


Slika 42. Konfiguracije ploča – a) homogena; b) višeslojna bez razmaka; c) višeslojna sa razmakom od 6mm

Konfiguracija s razmakom zanimljiva je iz razloga što se u realne oklope ugrađuju razni slojevi materijala čija mehanička svojstva gotovo da ne utječu na kinetički penetrator (ali imaju druga svojstva radi kojih se ugrađuju) i mogu u simulacijama biti reprezentirana

praznim prostorom. Simulacije za ispitivanje utjecaja konfiguracije ploča na probijanje izvedene su sa projektilom sa koničnim vrhom (geometrija prikazana na slici 10), istim parametrima materijala kao i ranije (tablica 2) te početnom brzinom projektila od 550 m/s.

Na slici 43 prikazane su brzine točke na kraju projektila tijekom 4 slučaja udara. Vidljivo je kako najbolju zaštitu prilikom probijanja pruža homogena ploča, jer najviše zaustavlja projektil (prosječna izlazna brzina 334,5 m/s – tablica 5). Druga najbolja konfiguracija je višeslojna konfiguracija bez međusobnog razmaka sa prosječnom izlaznom brzinom od 344,3 m/s, a najlošija konfiguracija je konfiguracija sastavljena od više ploča sa razmakom između njih (prosječna izlazna brzina 359,8 m/s – tablica 5). Na slici 43 prikazana je i krivulja brzine točke na projektilu tijekom probijanja homogene ploče debljine 12 mm, kako bi se prikazalo da je prvi dio udara projektila u višeslojnu ploču sa razmakom jednak slučaju udara u homogenu ploču debljine 12 mm. Nakon dodira projektila sa drugom pločom, dolazi do dodatnog otpora na projektil i pada brzine. Valja spomenuti kako su prosječne izlazne brzine dobivene uprosječavanjem vrijednosti brzina u intervalu od $1{,}2\text{x}10^{-1}$ ms do $2{,}8\text{x}10^{-1}$ ms.



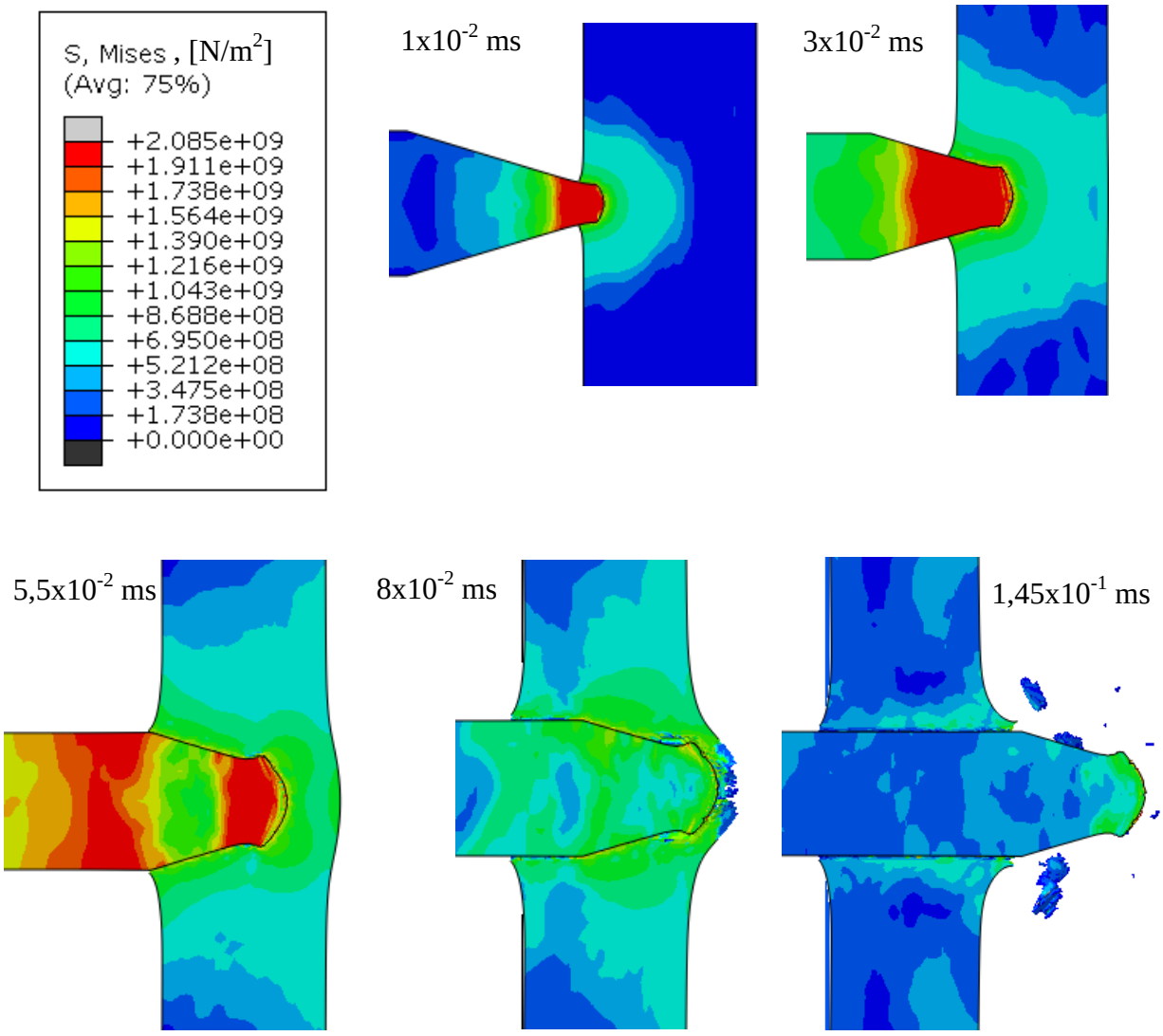
Slika 43. Brzine projektila tijekom udara u konfiguracije meta koničnim projektilom ulazne brzine 550 m/s

Tablica 5. Prosječne izlazne brzine koničnog projektila za tri konfiguracije meta

	Homogena ploča debljine 24mm	Višeslojna ploča bez razmaka	Višeslojna ploča s razmakom
Prosječna izlazna brzina, [m/s]	334,5	344,3	359,8

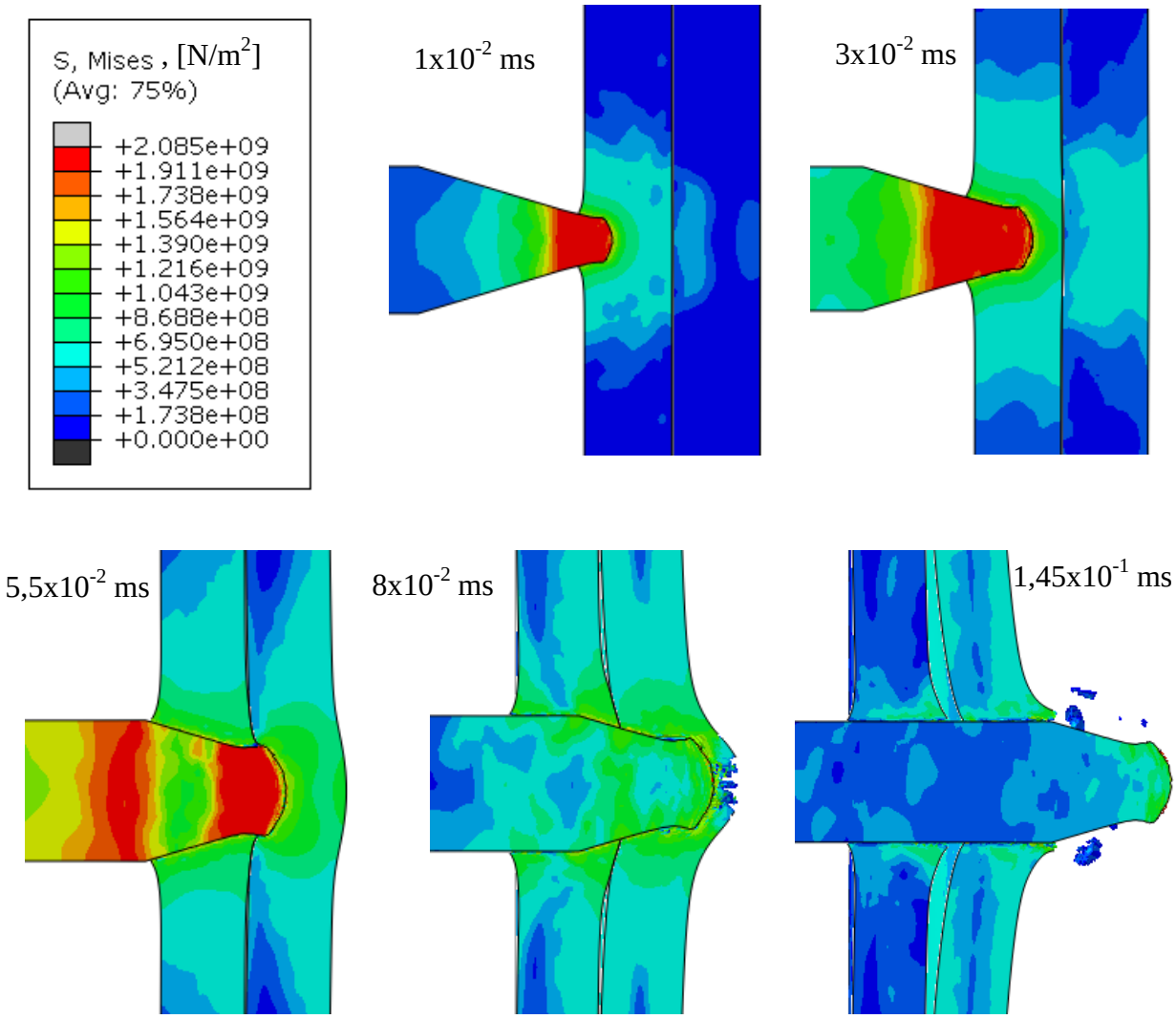
Takav odnos otpora homogene i višeslojnih ploča zabilježen je i u [14] gdje su prikazane cijele balističke krivulje za slučajeve homogenih ploča debljine 2 mm i 4 mm te višeslojnih konfiguracija ploča debljine 2 mm bez razmaka između njih i sa 15 mm razmaka između ploča.

Naprezanje prilikom probijanja homogene ploče debljine 24 mm prikazano je na slici 44.



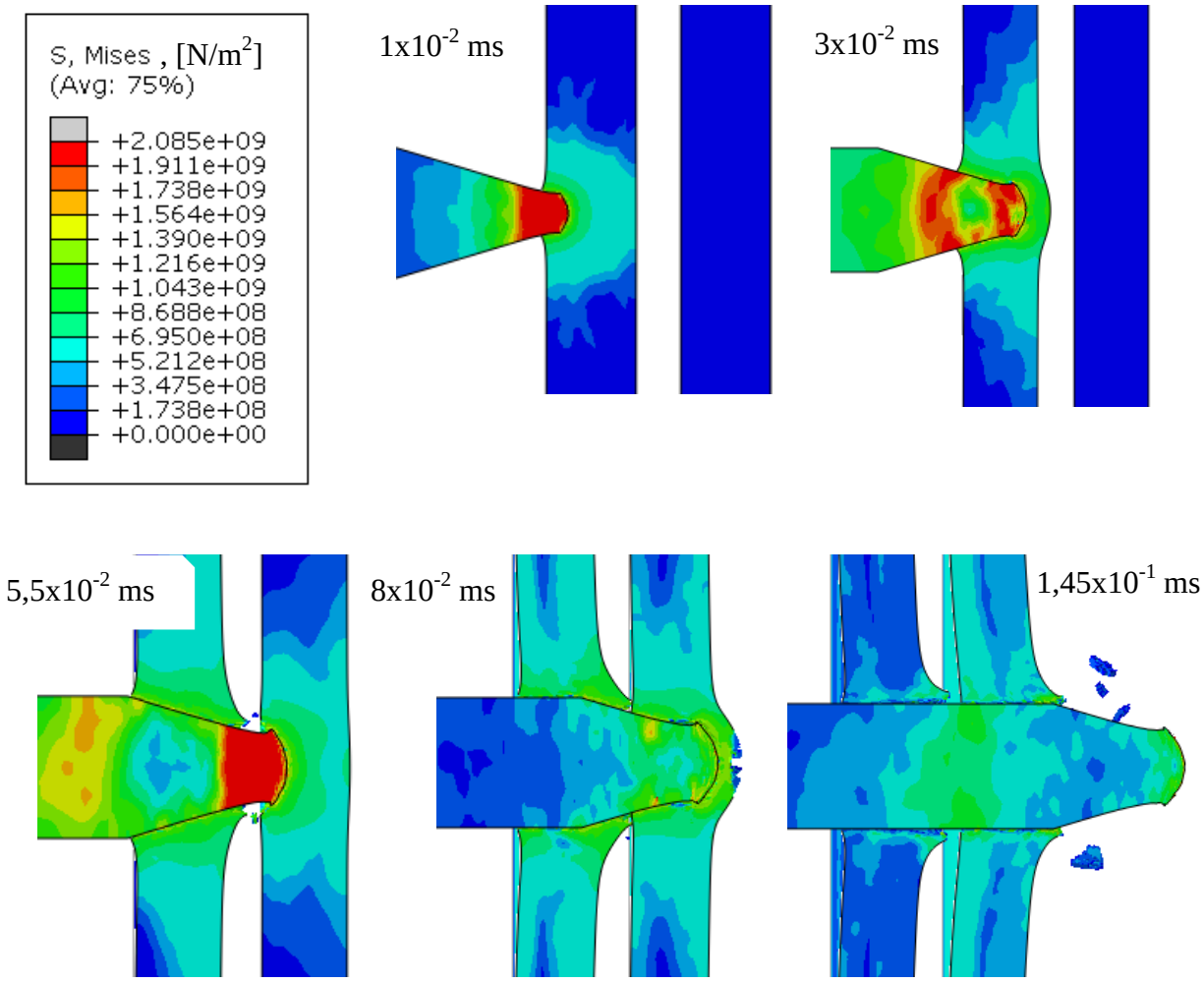
Slika 44. Naprezanja prilikom probijanja homogene ploče debljine 24 mm koničnim projektilom s ulaznom brzinom 550 m/s

Naprezanje prilikom probijanja višeslojne ploče bez razmaka između ploča prikazano je na slici 45.



Slika 45. Naprezanja prilikom probijanja višeslojne ploče bez razmaka koničnim projektilom s ulaznom brzinom 550 m/s

Naprezanje prilikom probijanja višeslojne ploče s razmakom između ploča prikazano je na slici 46.



Slika 46. Naprezanja prilikom probijanja višeslojne ploče s razmakom koničnim projektilom s ulaznom brzinom 550 m/s

ZAKLJUČAK

Procjenjivanje razine balističke zaštite pomoću numeričkih simulacija moguće je ostvariti vrlo uspješno i numerički učinkovito. Numeričke simulacije mogu poslužiti kao dobar alat za procjenjivanje ponašanja konstrukcije već u fazi konstruiranja, što može donijeti značajne uštede. Za to je potrebno poznavati karakteristike materijala, ali još bitnije, materijalni model sa odgovarajućim parametrima, koji treba uzeti u obzir dovoljno efekata koji se javljaju pri udarima. U literaturi postoje već razvijeni modeli, poput onog razvijenog u [4]. Ukoliko implementiranje kompletnog modela nije moguće, djelomični materijalni model daje ograničeno dobre rezultate, no na dijelu raspona debljina (12 mm, 16 mm i 20 mm) balističke krivulje dobro se poklapaju sa eksperimentalno određenim krivuljama iz [4] (slika 27). Kod projektila sa ravnim vrhom primijećen je način popuštanja gdje se iz ploče izbija čep (i eksperimentalno [4] i numerički – slika 24). Plastično deformiranje projektila znatno je poboljšalo rezultate simulacije, jer se pokazalo da kod debljih ploča uvodi dodatni mehanizam usporavanja projektila (slika 24). Kut udara na probijanje utječe tako da pomiče balističku krivulju udesno (slika 32), što znači da za granično probijanje projektil mora udariti u ploču većom brzinom. To se događa jer je efektivna debljina (teoretska udaljenost koju projektil prođe tijekom koje je u interakciji s pločom) veća sa povećanjem kuta udara (slika 33). Kod udara pod kutem je također primijećeno formiranje i izbijanje čepa, koji se formira približno u smjeru uzdužne osi projektila, a ne okomito na normalu ploče kao u slučaju okomitog udara na ploču (slika 35). Nakon izbijanja čepa, projektil koji probije ploču i izađe iz ploče, putuje brzinom koja je različitog smjera od brzine projektila na početku (slika 34). Oblik vrha projektila utječe na probijanje – probijanje projektila s koničnim vrhom pokazalo se neefikasnijim od probijanja projektila s ravnim vrhom (slika 37). To je zbog mehanizma usporavanja projektila s koničnim vrhom pri probijanju ploče, gdje on širi prvotno probijenu rupu na stražnjoj strani svojim konusom (slika 40). Ipak, realni projektili se ne izrađuju sa ravnim vrhom, jer je i u [4] kod ploča većih debljina prilikom eksperimenata došlo do fragmentiranja projektila (slika 38). To se dogodilo iz razloga što projektil nema dovoljno kinetičke energije ni čvrstoće da formira čep u debljoj ploči. Konfiguracija mete ima utjecaj na probijanje. Pokazano je da je homogena ploča najotpornija na probijanje tj. najviše je usporila projektil. Višeslojna konfiguracija mete bez razmaka između ploča slabije je usporila

projektil od homogene, no više od višeslojne konfiguracije mete sa razmakom između ploča (slika 43).

Daljnji razvoj simulacija moguć je uz progušćivanje mreže na mjestu udara. To bi povećalo potrebu za računalnim resursima (iznad mogućnosti *hardware-a* koji je korišten pri simulacijama za ovaj rad), ali bi rezultati simulacija za projektile sa ulaznom brzinom oko granične brzine probijanja bili bolji [4]. Također, logičan korak je i upotreba adaptivne analize u simulacijama probijanja koničnog projektila kako bi se otklonili problemi distordiranosti elemenata na vrhu projektila. Zanimljivo bi bilo i provesti analizu pomoću bezmrežne metode prema SPH teoriji i usporediti je sa izvedenim simulacijama, ali i literaturom u kojoj su već takvi različiti pristupi uspoređeni.

LITERATURA

[1] http://www.army-guide.com/eng/product2050.html [Pristup 12. 5. 2015.].

[2] http://tanknutdave.com/canadian-leopard-2-tanks/. [Pristup 24. 4. 2015].

[3] D. E. Carlucci, S. S. Jacobson: BALLISTICS Theory and Design of Guns and Ammunition, Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2014.

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

[5] J. A. Zukas; T. Nicholas; H. F. Swift; L. B. Greszczuk; D. R. Curran: Impact Dynamics, Wiley, 1982.

[6] A. Arias; J. Rodriguez-Martinez; A. Rusinek, Numerical simulations of impact behaviour of thin steel plates subjected to cylindrical, conical and hemispherical non-deformable projectiles, *Engineering Fracture Mechanics*, svez. 75, pp. 1635-1656, 2008.

[7] Dassault systems, *Abaqus 6.12 Documentation.*

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

[9] I. Faidzuli; A. Roslan: Failure investigation of steel plates impacted by 20 mm diameter blunt projectiles using PAM-SHOCK, School of Mechanical Engineering, Engineering Campus, Universiti Sains Malaysia.

[10] Y. Ali; A. Riad: Perforation of Thick Plates by High-Speed Projectiles, *13 th International Conference on AEROSPACE SCIENCES & AVIATION TECHNOLOGY, ASAT-13*, Cairo, 2009.

[11] N. Kiliç; B. Ekici: Ballistic resistance of high hardness armor steels against 7.62 mm armor piercing ammunition, *Materials and Design*, svez. 44, pp. 35-48, 2013.

[12] V. Sháněl; M. Španiel: Balistic impact experiments and modelling of sandwich armor for numerical simulations, *37th National Conference on Theoretical and Applied Mechanics (37th NCTAM 2013) & The 1st International Conference on Mechanics (1st ICM)*, Hsinchu, 2014.

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

[14] T. Jankowiak; A. Rusinek; P. Wood: A numerical analysis of the dynamic behaviour of

sheet steel perforated by a conical pojectile under ballistic conditions, *Finite Elements in Analysis and Design*, svez. 65, pp. 39-49, 2013.

[15] G. R. Johnson; W. H. Cook, A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures, *7th Symposium on ballistics*, Hague, 1983.

[16] A. He; G. Xie; H. Zhang; X. Wang, A comparative study on Johnson-Cook, modified Johnson-Cook and Arrhenius-type constitutive models to predict the high temperature flow stress in 20CrMo alloy steel, *Materials and Design*, svez. 52, pp. 677-685, 2013.

[17] G. R. Johnson; W. H. Cook: Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures, *Engineering fracture mechanics*, svez. 21, br. 1, pp. 31-48, 1985.

[18] G. Z. Voyiadjis; P. I. Kattan: Damage mechanics, Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2005.

[19] G. Camacho; M. Ortiz: Adaptive Lagrangian modelling of ballistic penetration of metallic targets, *Computational methods in applied mechanics and engineering*, svez. 142, pp. 269-301, 1997.

[20] http://www.ntnu.edu/simlab/testing/gasgun. [Pristup 30. 4. 2015.].

[21] B. Kraut, Strojarski priručnik, Zagreb: Sajema d.o.o, 2009.

PRILOZI

I. CD-R disc