Numerička analiza udara projektila u zrakoplovnu konstrukciju

Leko, Marko

Master's thesis / Diplomski rad

2017

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:555702

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

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







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Marko Leko

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:
Prof. dr. sc. Ivica Smojver

Student:
Marko Leko

Zagreb, 2017.

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. Docentu dr.sc. Darku Ivančeviću zahvaljujem na savjetima, te velikoj strpljivosti i ustupljenom računalu. Svim kolegama, asistentima i profesorima koji su mi na bilo koji način pomogli tijekom studija srdačno zahvaljujem.
Najveća zahvala obitelji i prijateljima na strpljenju, pomoći i podršci tijekom studiranja te izrade ovog diplomskog rada.

Marko Leko

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

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

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Marko Leko** Mat. br.: 0035184250

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Numerička analiza udara projektila u zrakoplovnu konstrukciju**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Numerical Analysis of Projectile Impact at Aeronautical Structure**

Opis zadatka:

Izvršiti numeričku analizu udara projektila u zrakoplovnu konstrukciju u svrhu određivanja granične (probojne) brzine. U radu treba koristiti numerički model koji predstavlja pojednostavljenu konstrukciju zrakoplova ili helikoptera. Potrebno je varirati konstrukcijske parametre koji utječu na graničnu brzinu kao što su debljina i zakrivljenost oplate. Geometriju projektila držati konstantnom, te ga modelirati kao izotropan ili po potrebi plastično deformabilan.

U sljedećoj fazi rada potrebno je varirati kut udara projektila te temeljem toga donijeti zaključke o balističkoj zaštiti zrakoplovnih konstrukcija. Pri modeliranju postaviti odgovarajuće početne i rubne uvjete, definirati trenje između projektila i mete, kao i kontakt između projektila i mete.

Za materijal mete koristiti materijale koji su uobičajeni u zrakoplovnim konstrukcijama. Materijal mete modelirati kao elastoplastičan uz razmatranje mehaničkih svojstava materijala pri velikim brzinama deformiranja. Temeljem iskustva u radu procijeniti mogućnosti poboljšanja balističke zaštite zrakoplovnih konstrukcija.

U radu korisiti programe za računalno modeliranje, a numeričku analizu izvršiti korištenjem programa Abaqus/Explicit. U radu navesti korištenu literaturu te eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:	Rok predaje rada:	Predviđeni datumi obrane:
9. ožujka 2017.	11. svibnja 2017.	17., 18. i 19. svibnja 2017.

Zadatak zadao: Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ivica Smojver Prof. dr. sc. Ivica Smojver

SADRŽAJ

SADRŽAJ I
POPIS SLIKA II
POPIS TABLICA IV
POPIS OZNAKA V
1. Uvod 1
1.1. Mehanika udara 3
1.2. Metoda numeričke integracije 7
1.2.1. Abaqus / Explicit 7
1.2.1. Stabilnost 8
2. Numeričke simulacije – opis i validacija materijalnog modela 10
2.1.Materijalni model 10
2.2. Validacija materijalnog modela 12
2.2.1. Numerički model ploče 13
2.2.3. Opterećenje 14
2.2.4. Trenje 15
2.2.5. Kontakt 15
2.2.6. Mreža konačnih elemenata 16
2.3. Validacija materijalnog modela ploče 18
2.3.1. Udar u ravnu ploču 19
2.3.2. Udar u ploču radiusa 111,6 mm 20
2.3.3. Udar u ploču radijusa 203,2 mm 21
3.Utjecaji parametara ploče i projektila na udar 24
3.1. Utjecaj debljine ploče 24
3.2. Utjecaj zakrivljenosti ploče 27
3.3. Utjecaj kuta udara 30
ZAKLJUČAK 38
LITERATURA 39
PRILOZI 40

POPIS SLIKA

Slika 1. Il-2 Šturmovik s označenim područjima koja su zaštićeni oklopom od čelika, brojevi na slici označuju debljinu zaštite u mm [2] 1
Slika 2. Mi171Sh [4] 2
Slika 3. Titanski oklop oko sjedala pilota na zrakoplovu A-10 Thunderbolt II 2
Slika 4. Načini popuštanja prilikom balističkog udara [7] 4
Slika 5. Von Mises naprezanja [MPa] pri formiranju čepa pri udaru kugličnog projektila brzinom od 242 m/s u ploču legure aluminija debljine 2,03 mm 5
Slika 6. Von Mises naprezanja [MPa] pri širenju rupe u ploči od legure aluminija debljine 5 mm projektilom sa šiljastim vrhom početne brzine od 500 m/s 5
Slika 7. Kvalitativni Hookeov dijagram pri vlačnom opterećenju legure aluminija [11] 10
Slika 8. Eksperimentalni postav za ispitivanje probijanja [13] 12
Slika 9. Uzorci ravne ploče, ploča radijusa zakrivljenosti 304,8 mm, ploča radijusa zakrivljenosti 203,2 mm i ploča radijusa zakrivljenosti 111,76 mm [13] 12
Slika 10. Rubni uvjeti na mjestu simetrije ploče 14
Slika 11. Polje početne brzine projektila 14
Slika 12. Rubni uvjeti simetrije ploče 15
Slika 13. Model ravne ploče s mrežom konačnih elemenata 16
Slika 14. Prikaz mreže na ravnoj ploči te uvećani dio ploče sa najguščom mrežom 17
Slika 15. Usporedba rezultata udara u ravnu ploču 19
Slika 16. Usporedba rezultata udara u ploču zakrivljenosti 111,6 mm 20
Slika 17. usporedba rezultata na ploči radijusa zakrivljenosti 203,6 mm 21
Slika 18. Von Mises naprezanja [MPa] tijekom probijanja zakrivljene ploče debljine 2 mm i radijusa zakrivljenosti 203,2 mm, projektilom početne brzine 160 m/s 22
Slika 19. Promjena brzine projektila tijekom probijanja 2,03 mm debele ploče početnom brzinom od 160 m/s 23
Slika 20. Kalibar 12,7 x 99 mm [17] te njegov CAD model 24
Slika 21. Utjecaj debljine ploče na preostalu brzinu projektila za Al 25
Slika 22. Von Mises naprezanja [MPa] tijekom probijanja Al ploče debljine 10 mm projektilom početne brzine 903 m/s 26
Slika 23. Usporedba zakrivljenosti 4 ploče legure aluminija 27
Slika 24. Numerički dobivene balističke krivulje za ploče različitih zakrivljenosti 28
Slika 25. Numerički izračunata kritična brzina probijanja za ploče različite zakrivljenosti ... 29

Slika 26. Projektil kalibra 5,56 x 45 mm [17] 30
Slika 27. Udar pod kutom – kut udara i koordinatni sustav 30
Slika 28. Balističke krivulje u ovisnosti o kutu udara projektila 31
Slika 29. Von Mises naprezanja [MPa] pri skretanju projektila početne brzine 500 m/s koji udara u ploču legure aluminija debljine 5 mm pod utem od 30 ° 33
Slika 30. Promjena brzine projektila tijekom udara u ploču debljine 5 mm početnom brzinom od 450 m/s i kutom udara od 10° 34
Slika 31. Prikaz promjena energija tijekom udara projektila pod kutom udara od 10° i početnom brzinom projektila od 450 m/s u Al ploču debljine 5 mm 35
Slika 32. Utjecaj početne brzine i početnog kuta udara α na promjenu kuta tijekom probijanja ploče 35
Slika 33 . Udar pod kutom – kut udara i koordinatni sustav 36
Slika 34. Prikaz promjena energija tijekom udara projektila bočnom površinom pod kutom udara od 10° i početnom brzinom projektila od 450 m/s u ploču legura aluminija debljine 5 mm 36
Slika 35. Balističke krivulje udara projektila o ploču debljine 5 mm m/s bočnom površinom i vrhom projektila pri početnim kutem udara od 10 ° 37

POPIS TABLICA

Tablica 1. Konstante za opisivanje plastičnog područja [14] 13
Tablica 2. Konstante za opisivanje područja oštećenja [14] 13
Tablica 3. Svojstva materijala potrebna za opisivanje njegovog elastičnog područja [14] 13
Tablica 4. Konstante za opisivanje plastičnog područja čelika [16] 15
Tablica 5. Konstante za opisivanje elastičnog područja čelika [16] 15
Tablica 6. Broj elemenata i čvorova u simulacijama 17
Tablica 7. Vrijednosti dobivenih i uspoređenih brzina za udar u ravnu ploču 19
Tablica 8. Vrijednosti dobivenih i uspoređenih brzina za udar u ploču radijusa 111,6 mm 20
Tablica 9. Vrijednosti dobivenih i uspoređenih brzina za udar u ploču radijusa 203,2 mm 21
Tablica 10. Vrijednosti izlaznih brzina pri udaru u ploče različitih debljina 25
Tablica 11. Podatci ulaznih i izlaznih brzina za kut udara od 10° 32
Tablica 12. Podatci ulaznih i izlaznih brzina za kut udara od 20° 32
Tablica 13. Podatci ulaznih i izlaznih brzina za kut udara od 30° 32
Tablica 14. Podatci ulaznih brzina i izlaznog kuta projektila za početni kut udara od 10° 33
Tablica 15. Podatci početnih brzina i izlaznog kuta projektila za početni kut udara od 20° 34
Tablica 16. Podatci početnih brzina i izlaznog kuta projektila za početni kut udara od 30° 34

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	N/mm^2	Granica tečenja
B	N/mm^2	Parametar koji opisuje utjecaj očvršćivanja materijala
C	N·s/m	Matrica prigušenja
c_d	m/s	Brzina širenja dilatacijskog vala u materijalu
C_1	-	Konstanta brzine deformacije za Johnson-Cook model
D	-	Parametar oštećenja u materijalu
D_1-D_5	-	Parametar Johnson-Cook modela za određivanje ekvivalentne plastične deformacije pri lomu
E	N/mm_2	Modul elastičnosti
$\mathbf{F_i}$	N	Vektor unutarnjih sila
$\mathbf{F_r}$	N	Vektor rezidualnih sila
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
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-Δt
$\mathbf{u}_{t+\Delta t}$	m	Vektor pomaka u trenutku t+Δt
$\dot{\mathbf{u}}$	m/s	Vektor brzina
$\dot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t}$	m/s	Vektor brzine u trenutku t+Δt
$\dot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t}$	m/s	Vektor brzine u trenutku t-Δt

$\dot{\mathbf{u}}_{\mathbf{t+\Delta t/2}}$	m/s	Vektor brzine u trenutku $t+\Delta t/2$
$\dot{\mathbf{u}}_{\mathbf{t-\Delta t/2}}$	m/s	Vektor brzine u trenutku $t-\Delta t/2$
$\ddot{\mathbf{u}}$	m/s2	Vektor ubrzanja
α	°	Napadni kut projektila
α_1	°	Izlazni kut projektila
$\Delta t_{stabilni}$	s	Stabilni vremenski inkrement
$\Delta\alpha$	°	Promjena kuta
$\varepsilon^f{}_{ekv}$	m/m	Ekvivalentna plastična deformacija pri lomu
ε_{pl}	m/m	Plastična deformacija
$\dot{\varepsilon}_{pl}$	1/s	Brzina plastične deformacije
$\dot{\varepsilon_0}$	1/s	Referentna brzina plastične deformacije
μ	-	Fakor trenja
ν	-	Poissonov faktor
ρ	kg/m3	Gustoća
σ^*	-	Bezdimenzijski omjer tlačnog naprezanja i ekvivalentnog naprezanja prema Von Misesu
ω_{max}	1/s	Najveća vlastita frekvencija sustava konačnih elemenata

SAŽETAK

U radu se daje kratak uvod u balističku zaštitu zrakoplova kao i osnovne podjele u području balistike te se opisuju metode kojima se rješavaju problemi u ovom području. U drugom poglavlju je opisan materijalni modela i validacija materijalnog modela u Abaqus/Explicit-u. Validacija približnog modela je provedena nizom simulacija udara balističkog projektila u ploče različitih zakrivljenosti pri različitim brzinama, nakon čega su rezultati uspoređeni s eksperimentalnim i numeričkim rezultatima. Nakon proširivanja materijalnog modela, odnosno uključivanja karakteristike plastičnog područja projektila ispitan je utjecaj debljine ploče kao i utjecaj njene zakrivljenosti na apsorpciju energije projektila tj. na njegovu izlaznu brzinu. Utjecaj kuta udara projektila ispitan je nizom simulacija za slučajeve različitih kutova udara projektila u ploču debljine 5 mm. Također, ispitani su slučajevi kada projektil svojom bočnom stranom udara u ploču. Rezultati su dani balističkim krivuljama kao i prikazima raspodjele naprezanja. Na kraju rada se nalaze mogućnosti unapređenja konstruktivnih karakteristika s ciljem poboljšanja balističke zaštite zrakoplova.

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

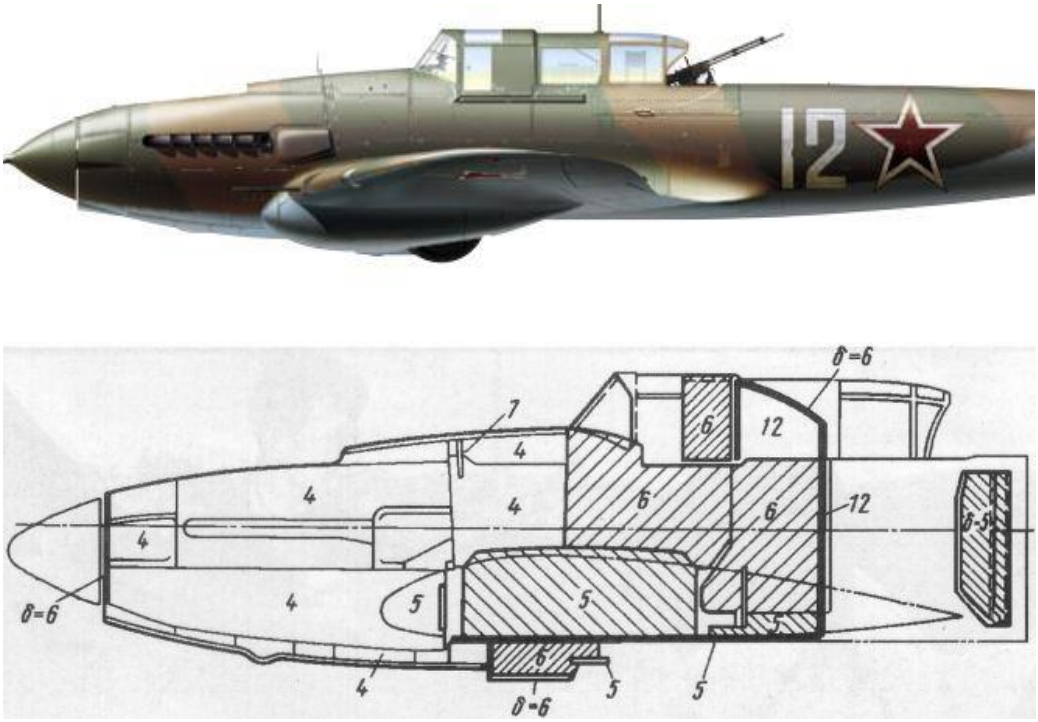
SUMMARY

This work provides a brief introduction to the ballistic protection of aircraft structures as well as the basic division of ballistics and the description of methods employed to solve problems in this area. The second chapter describes the material models and validation of the material model in Abaqus/Explicit. Validation of the numerical model was performed by a series of simulations of ballistic impacts on plates with varying curvature at different impact velocities, after which the results were compared with experimental and numerical results. After the expansion of the material model by the inclusion of the projetile plasticity, the influence of the plate thickness, as well as the influence of its curvature on the energy absorption of the projectile, i.e. at its residual velocity, was studied. The influence of the incidence impact angle was investigated by a series of simulations for cases of different impact angles of incidence of the projectile on a 5 mm thick plate. Various cases were also investigated in which the projectile side-impacted the plate. The results are given in the form of ballistic curves as well as stress distributions. Structural design approaches with improved ballistic protection of the aircraft are presented in the final chapter.

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

1. UVOD

Razvoj zrakoplovnih konstrukcija je u svojim ranijim početcima bio usko vezan s razvojem materijala. Tijekom početaka, kada su korišteni materijali organske prirode za konstrukciju zrakoplova, na balističku zaštitu se nije moglo utjecati pošto su projektili jednostavno penetrirali u te materijale. Tadašnji motori slabijih performansi nisu mogli osigurati snagu za let zrakoplova sa metalnom konstrukcijom radi velike gustoće metala. Kasnijim razvojem materijala i motora omogućena je primjena lakih metala u zrakoplovstvu te je omogućeno istraživanje o primjeni metala u balističkoj zaštiti konstrukcije zrakoplova. Balistička zaštita se koristi u različitim granama zrakoplovstva, od borbenih i transportnih zrakoplova, do helikoptera. Kroz ovaj rad će se govoriti o zaštiti zrakoplova, posade i tereta putem metalnih ploča različitih dimenzija i oblika. Zbog svoje velike mase balistički štitovi, odnosno oklopi, utječu na performanse zrakoplova; njegovu upravljivost, a nadalje i na maksimalni teret zrakoplova [1]. U ranim početcima balističke zaštite zrakoplovnih konstrukcija koristili su se čelični oklopi. Jedan od poznatijih primjera, upravo po masivnosti štita, je sovjetski Il-2 Šturmovik čiji je štit imao oko 700 kg te je štitio veliki dio zrakoplova [2]. Oklopna zaštita Il-2 Šturmovik-a prikazana je na Slici 1.



Slika 1. Il-2 Šturmovik s označenim područjima koja su zaštićeni oklopom od čelika, brojevi na slici označuju debljinu zaštite u mm [2]

Tijekom Vijetnamskog rata Američke su snage konstrukciju poda helikoptera dodatno ojačali pločama od Al legura kako bi zaštitili posadu od projektila sa zemlje [3]. Za balističku zaštitu zrakoplovnih konstrukcija koriste se i legure titana. Oklopna zaštita na helikopteru Mi171Sh, koji se nalazi u sastavu Hrvatskog ratnog zrakoplovstva, izvedena je pločama od titana koje se postavljaju s donje strane cjelokupnog trupa helikoptera. Helikopter Mi171Sh prikazan je na Slici 2.



Slika 2. Mi171Sh [4]

Osim primjene na helikopterima, titan se koristi i na borbenim zrakoplovima. Konstrukcija trupa koja se nalazi oko pilotskog sjedala na A-10 Thunderbolt II napravljena je od titana. Konstrukcija je teška 318 kg i podnosi udare projektila kalibra do 23 mm [5]. Zrakoplov, kao i njegov oklop oko pilotskog sjedala prikazani su na na Slici 3.



Slika 3. Titanski oklop oko sjedala pilota na zrakoplovu A-10 Thunderbolt II

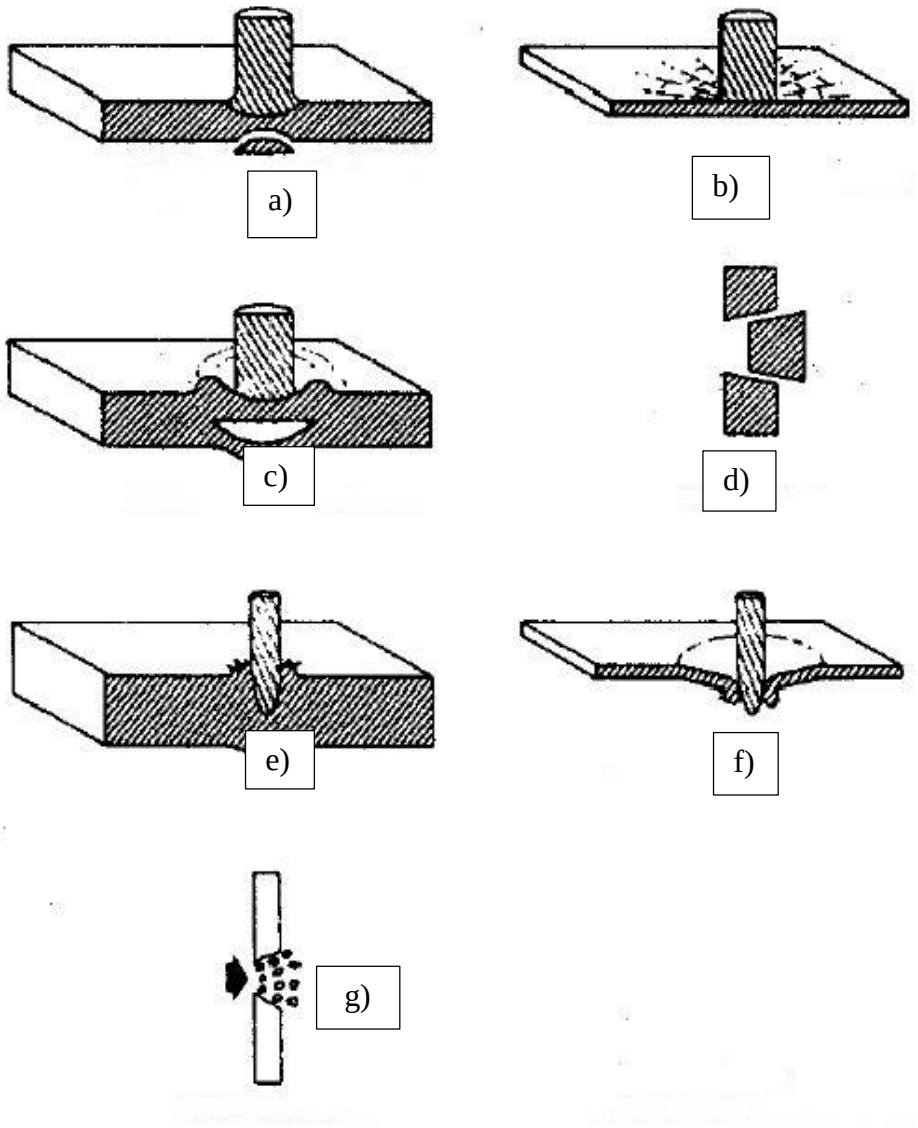
U procesu konstruiranja zrakoplova i njegove oklopne zaštite potrebno je predvidjeti ponašanje konstrukcije. U ovom radu ispitani su utjecaji određenih konstrukcijskih mjera koje utječu na

otpornost oklopa na balistički udar. Konstruktorima na raspolaganju stoji nekoliko mjera kako bi povećali otpornost oklopa na utjecaj projektila. Pod konstrukcijskim mjerama misli se na variranje parametara poput: oblika, debljine i vrste materijala korištenih u svrhu balističke zaštite.

1.1.Mehanika udara

Balistiku je moguće podijeliti u nekoliko područja. Unutarnja balistika bavi se interakcijom projektila i cijevi prije izlaska projektila iz cijevi iz koje je ispaljen. Vanjska balistika bavi se pojavama pri letu projektila do udara u metu, a terminalna balistika bavi se događajima kada projektil udara u metu [6]. Prema tome, predviđanjem ponašanja oklopa i razine oklopne zaštite bavi se terminalna balistika.

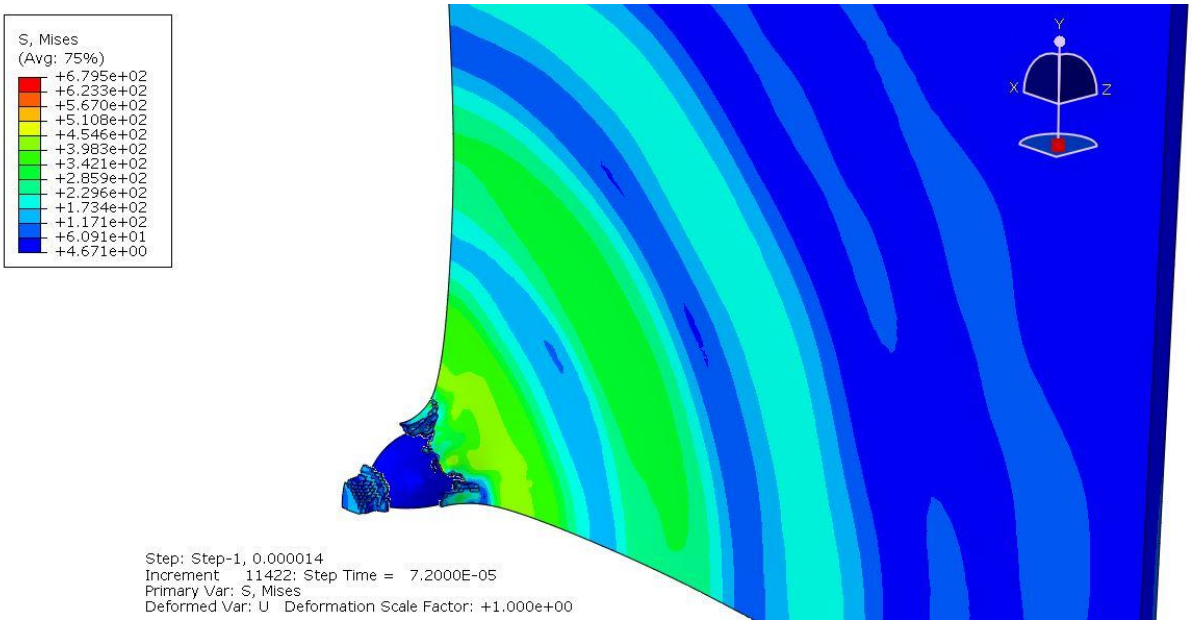
Modeli penetracije se temelje na zakonima očuvanja energije. Kada se dogodi udar, dio kinetičke energije se prenosi na ploču. Određeni dio energije koristi se za deformaciju ploče. Ostala energija se oslobađa kao svjetlost i toplina, a ostatak energije prenosi se na fragmente kao kinetičke energije. Udar je jako lokalizirani događaj. Naprezanja i deformacije su uobičajeno lokalizirani na područje površine čiji je radijus 3-6 puta veći od radijusa projektila [7]. Predmet u koji projektil udara, može popustiti kombinacijom različitih načina popuštanja koji su prikazani na Slici 4. Oni se javljaju ovisno o svojstvima oklopa i projektila.



Slika 4. Načini popuštanja prilikom balističkog udara [7]

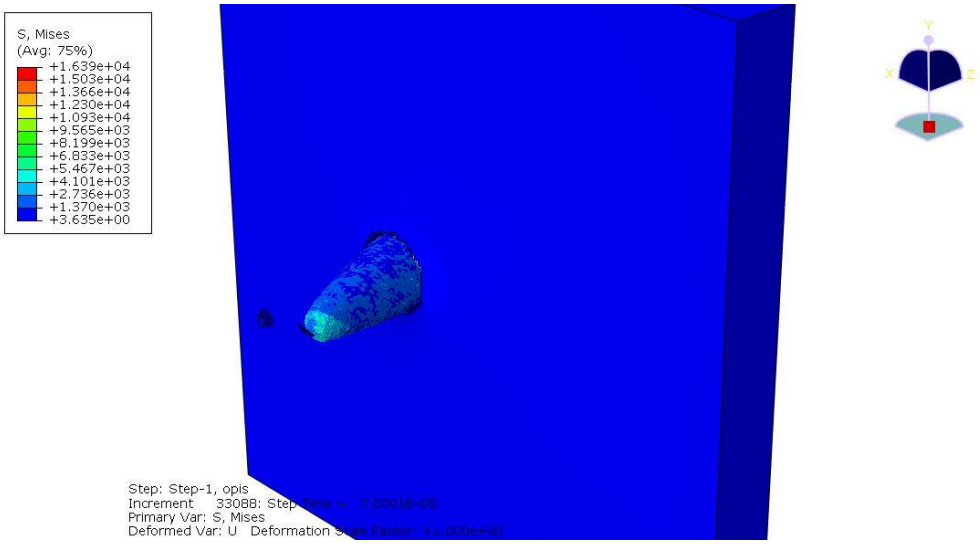
Slika 4.d. prikazuje čep koji nastaje uslijed adijabatskog smicanja pri kojem se formira usko područje smičnih naprezanja [6]. Na tom području se sav rad plastične deformacije pretvara u toplinu, koja uzrokuje lokalni rast temperature jer se zbog brzine deformacije i kratkog trajanja procesa ne stigne proširiti kroz materijal prema ostatku mete. Taj lokalni rast topline uzrokuje dodatno plastično tečenje u zoni smičnih naprezanja sve do rasterećenja ili loma materijala [8].Kao što je i rečeno popuštanje se u većini slučajeva događa pri kombinaciji raznih načina popuštanja. Na Slici 5. je najuočljiviji je način pri kojem nastaje čep, ali se može uočiti i način popuštanja koji se pojavljuje pri udaru projektila sa šiljastim vrhom u tanku ploču (Slika 4. f)

Slika 5 prikazuje Von Mises naprezanja pri udaru elastičnog kugličnog projektila o elastoplastičnu ravnu ploču. U poglavlju 2.3.1. dana je kompletna analiza rezultata.



Slika 5. Von Mises naprezanja [MPa] pri formiranju čepa pri udaru kugličnog projektila brzinom od 242 m/s u ploču legure aluminija debljine 2,03 mm

Pri perforiranju projektila sa „šiljastim“ vrhom (tj. u najvećem broju slučajeva projektili s koničnim vrhom ili vrhom oblika dijela kružnice u presjeku) dolazi do načina popuštanja prikazanog na Slikama 4. e) i f) i Slici 5. pri čemu projektil penetrira metu u točki udara i širi rupu gurajući radijalno materijal [8]. Slika 5. prikazuje Von Mises naprezanja [MPa] pri širenju rupe u elastoplastičnoj ploči od legure aluminija debljine 5 mm elastoplastičnim projektilom sa šiljastim vrhom početne brzine od 500 m/s. U poglavlju 3.1. dana je kompletna analiza rezultata.



Slika 6. Von Mises naprezanja [MPa] pri širenju rupe u ploči od legure aluminija debljine 5 mm projektilom sa šiljastim vrhom početne brzine od 500 m/s

Načini popuštanja na slikama 4. a), c) i g) slični su i ne uključuju nužno perforaciju ploče. Kod načina popuštanja a) i c) je karakteristična fragmentacija na stražnjoj površini uzrokovana refleksijom vala naprezanja na stražnjoj površini mete (štita) [8].

Za predviđanje događaja udara projektila u oklop bitno je poznavanje područja balistike. Postoji nekoliko pristupa za određivanje razine oklopne zaštitne. Prvi pristup je empirijski 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 pri čemu se ne pokušava uzeti u obzir nikakve fizikalne pojave, nego se izvodi funkcija isključivo na temelju podataka [7]. Eksperimentalno ispitivanje je skupo jer je za njega potreban eksperimentalni postav na kojem se mora moći upravljati uvjetima udara, te oprema koja će pratiti događaje pri udaru (visoko kvalitetni vizualni sustav). Za njega je potrebno izvesti veliki broj ispitivanja kako bi se prikupio dovoljan broj podataka za različite konfiguracije.

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 teorije koje opisuju određeni dio udara ili koje dobro opisuju ponašanje materijala pri probijanju s određenim načinom popuštanja. Takvi matematički modeli se moraju validirati u smislu da se za određene materijale i konfiguracije moraju odrediti parametri modela na temelju eksperimentalnih podataka. Problem analitičkog pristupa je da su matematički modeli dosta ograničeni na konkretne uvjete tj. vrijede za konkretne materijale i/ili konfiguracije mete [7].

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 [7]. Predstavljaju općenitiji pristup u odnosu na analitičke modele, no cijena toga je računalna zahtjevnost. Također numerički dobiveni rezultati se moraju usporediti s eksperimentalnim rezultatima, odnosno moraju se validirati. Ovaj model zahtijeva korištenje vjernih materijalnih modela. Materijalni modeli moraju biti detaljno definirani u smislu da se puno fizikalnih pojava mora opisati jednadžbama s odgovarajućim parametrima. U suprotnom se model ne ponaša dovoljno vjerno u svim slučajevima. Parametri materijalnih modela određuju se usporedbom rezultata numeričkih modela s eksperimentalnim rezultatima.

1.2. Metoda numeričke integracije

Abaqus 6.13, omogućava rješavanje statičkih i dinamičkih problema [10]. Kod dinamičkih problema, kakav je i problem udara projektila u konstrukciju zrakoplova, za integriranje jednadžbi gibanja koriste se operatori numeričke integracije koji se dijele na implicitne i eksplicitne. Eksplicitne, kakve koristi Abaqus/Explicit, računaju vrijednosti dinamičkih varijabli u trenutku $t+\Delta t$ koristeći poznate vrijednosti u trenutku t . Najčešće korištena eksplicitna shema centralnih razlika je samo uvjetno stabilna, s granicom stabilnosti približno jednakoj vremenu potrebnom da poremećajni val prođe duljinu najmanjeg elementa u modelu. Dok Abaqus/Explicit koristi samo direktnu integraciju, Abaqus/Standard nudi mogućnost odabira između direktne integracije i metode modalne superpozicije, te ju je moguće koristiti samo za potpuno linearne ili blago nelinearne probleme modela [10]. Kako je analiza balističkog udara izrazito nelinearna s ekstremnim diskontinuitetima, kao izbor nameće se eksplicitna shema integracije. Upotreba numeričkih modela temelji se na rješavanju sustava diferencijalnih jednadžbi numeričkim metodama.

1.2.1. Abaqus / Explicit

Za probleme udara velikom brzinom, uobičajena je upotreba direktne eksplicitne metode integriranja diferencijalnih jednadžbi. Za vremensko integriranje jednadžbi gibanja Abaqus/Explicit koristi metodu središnjih razlika [9]. Metoda općenito funkcionira tako da se nepoznate veličine za naredni vremenski trenutak $t+\Delta t$ određuju na temelju poznatih veličina za trenutak t, bez potrebe za iteracijskim postupcima unutar inkrementa.

Prema jednadžbi dinamičke ravnoteže zbroj umnožaka matrice mase i vektora ubrzanja, matrice prigušenja i vektora brzine, te matrice krutosti i vektora pomaka jedak je vektoru vanjskog opterećenja. Vektor čvornih sila F_r jednak je razlici vektora vanjskih sila i unutarnjih sila elemenata. Ovaj je uvjet prikazan jednadžbom

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

Ubrzanja se računaju iz (1)

$$\ddot{\mathbf{u}} = \mathbf{M}^{-1} \cdot \mathbf{F_r}, \qquad (2)$$

gdje je $\mathbf{F_r}$ vektor rezidualnih sila definiran kao razlika između vektora vanjskog opterećenja $\mathbf{R}(t)$ i vektora unutarnjih sila $\mathbf{F_i}$. Za određivanje vektora rezidualnih sila potrebno je poznavati vektor brzina $\dot{\mathbf{u}}$ i vektor pomaka $\mathbf{u}$ za trenutak t. Za izračun brzina koristi se integracija prema

pravilu središnjih diferencija uz pretpostavku konstantnih ubrzanja. Netočnosti koje proizlaze iz ove pretpostavke se smanjuju smanjivanjem vremenskog koraka integracije Δt . Brzine se računaju na sredini tekućeg inkrementa zbrajanjem promjene brzine sa brzinom u sredini prethodnog inkrementa [10].

$$\dot{\mathbf{u}}_{t+\frac{\Delta t}{2}} = \dot{\mathbf{u}}_{t-\frac{\Delta t}{2}} + (\frac{\Delta t_{t+\Delta t}+\Delta t_t}{2})\ddot{\mathbf{u}}_t \ . \qquad (3)$$

Vektor pomaka čvorova se računa zbrajanjem pomaka prethodnog koraka sa umnoškom vremenskog koraka i izračunate brzine na sredini tekućeg vremenskog koraka

$$\mathbf{u}_{t+\Delta t} = \mathbf{u}_t + \Delta t_{t+\Delta t}\dot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t} \ . \qquad (4)$$

Na taj su način određena ubrzanja, brzine i pomaci tekućeg koraka, pomoću kojih se mogu izračunati ubrzanja, brzine i pomaci slijedećeg koraka, tako da algoritam eksplicitno napreduje kroz vrijeme.

1.2.1. Stabilnost

Kao što je navedeno u uvodu, shema centralnih razlika koju koristi Abaqus/Explicit je uvjetno stabilna. Granica stabilnosti (bez prigušenja) može se izraziti preko vrijednosti najviše vlastite frekvencije modela [10]

$$\Delta t_{stabilni} = \frac{2}{\omega_{max}}, \qquad (5)$$

gdje je ω_{max} najveća vlastita frekvencija sustava konačnih elemenata.

Kod sustava sa prigušenjem ona iznosi

$$\Delta t_{stabilni} = \frac{2}{\omega_{max}}(\sqrt{1-\xi^2} - \xi), \qquad (6)$$

gdje je ξ relativno prigušenje kod najveće vlastite frekvencije.

Postupak odabira vremenskog inkrementa u programu Abaqus/Explicit je automatiziran. Računanje stabilnog vremenskog inkrementa moguće je računanjem maksimalne vlastite frekvencije svakog elementa posebno ili koristeći algoritam za globalnu procjenu koji računa maksimalnu vlastitu frekvenciju cijelog modela. Računanje vlastite frekvencije svakog elementa daje konzervativne rezultate odnosno rezultira manjom vrijednošću stabilnog vremenskog inkrementa za razliku od postupka računanja vlastite frekvencije cijelog modela. Abaqus/Explicit koristi jednostavnu i konzervativnu procjenu iznosa graničnog stabilnog

vremenskog koraka. Procjena se određuje na osnovu omjera najmanje duljine elementa L_e i brzine širenja vala c_d kroz njega,

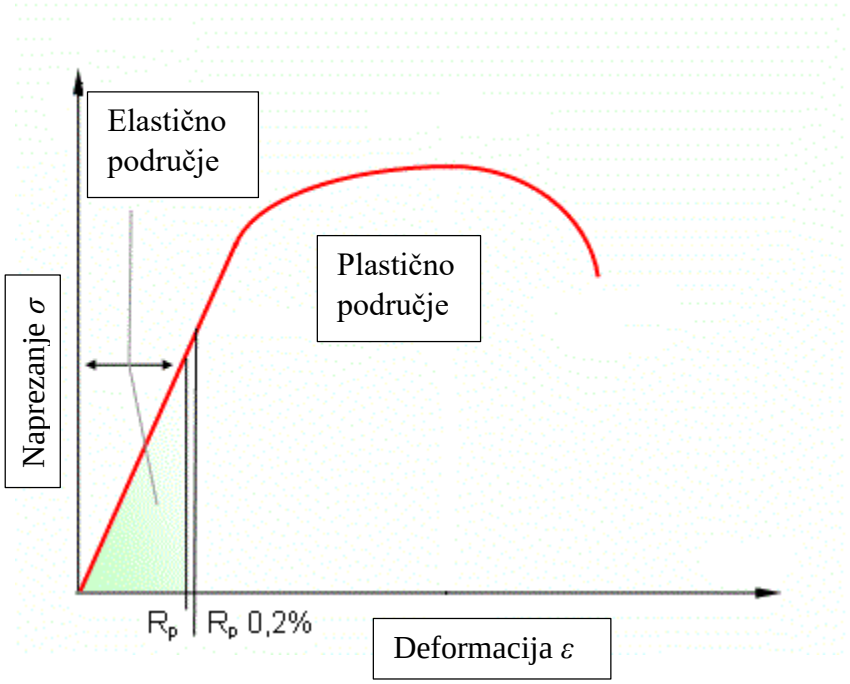
$$\Delta t_{stabilni} = min\left(\frac{L_e}{C_d}\right), \qquad (7)$$

pri čemu c_d ovisi o svojstvima materijala (gustoći, modulu elastičnosti). Iz toga se može zaključiti da na stabilnost analize utječe mreža konačnih elemenata kao i svojstva materijala.

2. NUMERIČKE SIMULACIJE - OPIS I VALIDACIJA MATERIJALNOG MODELA

2.1.Materijalni model

Materijalni model je pojam koji označava niz pravila u obliku jednadžbi koja opisuju ponašanje materijala. Te 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 (Slika 7). 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 deformacije. Slijedi poslije elastičnog područja nakon što se prijeđe granica tečenja (Slika 7) i ovisno o vrsti materijala se može opisati na više načina. Najjednostavnije je karakteristiku (funkciju ovisnosti naprezanja o deformaciji) u plastičnom području pretpostavljati idealnom, pri čemu granica tečenja s rastom deformacije ostaje konstantna. Ako to ne odgovara dovoljno realnom ponašanju materijala, karakteristika uključuje očvršćenje (rast granice tečenja s porastom deformacije) ili mekšanje (pad granice tečenja s porastom deformacija) materijala. Područje oštećenja materijala opisuje inicijaciju i propagaciju pukotine u materijalu koja završava lomom [13] ako prije toga ne dođe do rasterećenja materijala.



Slika 7. Kvalitativni Hookeov dijagram pri vlačnom opterećenju legure aluminija [11]

2.1.1. Johnson Cook materijalni model

Model za plastično područje koji se koristi za opisivanje područja udara projektila je Johnson-Cook-ov model plastičnosti. Johnson Cook model uključuje ovisnost naprezanja tečenja o plastičnoj deformaciji, brzini deformacije i temperaturi. Za Johnson-Cook-ov model plastičnosti glasi

$$\sigma_T = \left[A + B \cdot \varepsilon_{pl}^{n}\right] \cdot \left[1 + C_1 \cdot ln\frac{\dot{\epsilon_{pl}}}{\dot{\epsilon_o}}\right] \cdot \left[1 - \left(\frac{T-T_o}{T_{melt}-T_0}\right)^m\right]. \qquad (8)$$

Model uključuje efekte očvršćivanja materijala i mekšanja materijala uslijed povišenja temperature. 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 [8]. U izrazu (8), *A* je statička granica tečenja, *B* i *n* su parametri koji opisuju očvršćenje uslijed plastične deformacije, C_1 je konstanta brzine deformacije, a *m* je parametar koji opisuje mekšanje uslijed promjene temperature. $\dot{\epsilon_o}$ je referentna brzina deformacije, T_0 je sobna temperatura, a T_{melt} je talište materijala [12].

Model koji opisuje oštećenje u materijalu je Johnson-Cook-ov model inicijacije i propagacije oštećenja u materijalu. On razinu oštećenja u materijalu opisuje pomoću parametra *D* koja se određuje pomoću izraza

$$D = \sum \frac{\Delta\varepsilon_{pl}}{\varepsilon_{ekv}^{f}}, \qquad (9)$$

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

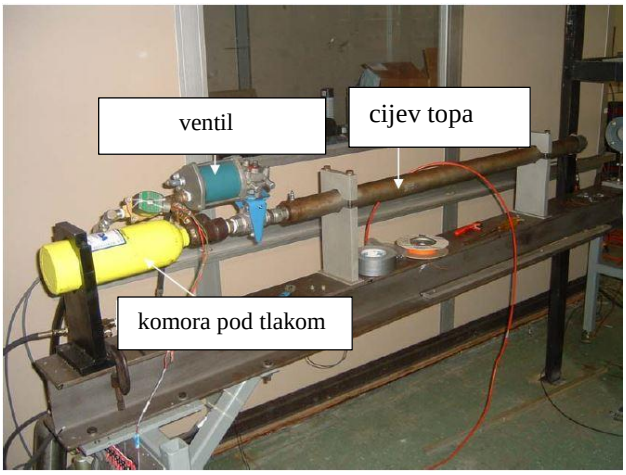
$$\varepsilon_{ekv}^{f} = \left[D_1 + D_2^{D_3 \cdot \sigma^*}\right] \cdot \left[1 + D_4 \cdot ln\frac{\dot{\epsilon_{pl}}}{\dot{\epsilon_o}}\right] \cdot \left[1 + D_5\left(\frac{T-T_o}{T_{melt}-T_0}\right)\right], \qquad (10)$$

gdje su D_{1-5} parametri Johnson-Cook-ovog modela, a σ^* je bezdimenzijski omjer hidrostatskog i ekvivalentnog naprezanja. ε_{pl} je plastična deformacija pri inicijaciji oštećenja u materijalu. Ta vrijednost se za svaki korak integracije određuje i uspoređuje sa trenutnom vrijednošću plastične deformacije u elementu [12].

Lom u materijalu (popuštanje materijalnih točaka) se događa kada parametar oštećenja dostigne vrijednost 1. Vrijednost parametra oštećenja D=0 označava stanje materijala bez oštećenja.

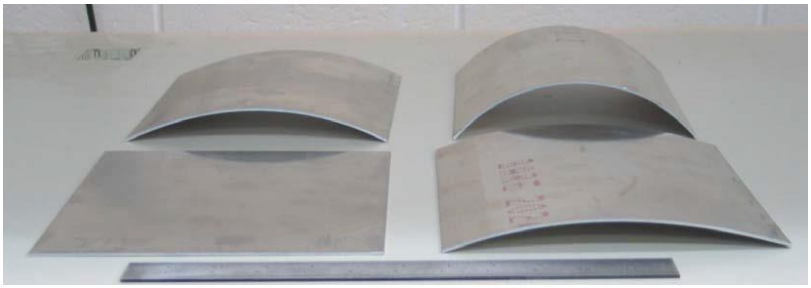
2.2.Validacija materijalnog modela

Aproksimaciju modela i numeričke simulacije potrebno je validirati usporedbom s eksperimentalnim rezultatima. Eksperimentalni rezultati uzeti su iz [13] i simulacije su izvedene kako bi pratile uvjete iz navedene literature. U eksperimentalnom postavu sa kojim su uspoređeni rezultati u validaciji korištena je legura aluminija 2024-T3. Eksperimentalni rezultati dobiveni su na eksperimentalnom postavu razvijenom na sveučilištu University of Maryland. Na tom sveučilištu su ispitali eksperimentalno, ali i numeričkom analizom u programu LS-DYNA (Livermore Software Technology Corporation, Livermore CA) udar projektila (čelične kugle promjera 12,7 mm) u 2,032 mm debelu aluminijsku ploču različitih zakrivljenosti. Projektil je ubrzan plinskim topom (Slika 8.) na brzine od 90 m/s do 280 m/s.



Slika 8. Eksperimentalni postav za ispitivanje probijanja [13]

Ispitivanje je napravljeno na četiri vrste ploča koje se razlikuju po zakrivljenosti te su ispitane pod udarima pri različitim brzinama. Ploče su prikazane na Slici 9.



Slika 9. Uzorci ravne ploče, ploča radijusa zakrivljenosti 304,8 mm, ploča radijusa zakrivljenosti 203,2 mm i ploča radijusa zakrivljenosti 111,76 mm [13]

Kako bi se mogle razmatrati daljnje konstrukcije uspoređeni su dobiveni numerički rezultati s rezultatima iz [13]. Usporedbom rezultata možemo zaključiti da je numerički model s njegovim karakteristikama dobro izrađen.

2.2.1. Numerički model ploče

Numerički model ploče je model pravokutne ploče duljine stranice od 203,2 mm (Slika 9.). Materijal korišten u simulaciji i eksperimentu [13] je legura aluminija 2024-T3 gustoće 2770 kg/m^3, a parametri za Johnson-Cook model za taj materijal se nalaze u Tablici 1. i 2. Legura aluminija 2024-T3 se često koristi na zrakoplovnim konstrukcijama, posebice na krilu i trupu zrakoplova.

Tablica 1. Konstante za opisivanje plastičnog područja [14]

A (MPa)	B (MPa)	C (-)	n(-)	m(-)	T_{melt}(K)	T_0(K)
368,98	683,97	0,0083	0,73	1,7	783	294

Tablica 2. Konstante za opisivanje područja oštećenja [14]

D_1 (-)	D_2 (-)	D_3 (-)	D_4 (-)	D_5 (-)
0,112	0,123	1,500	0,007	0,0

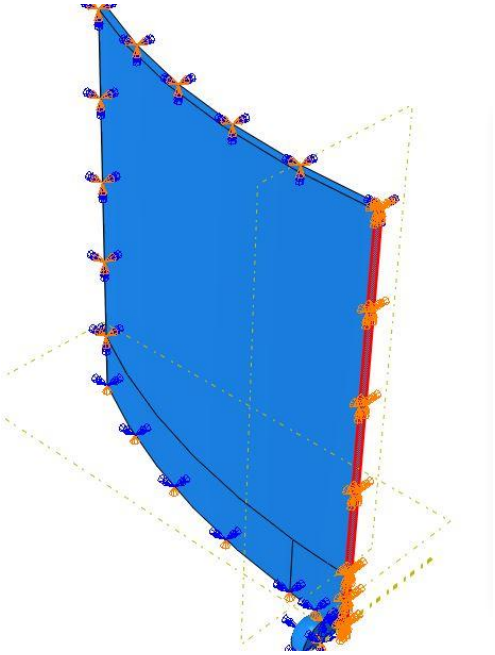
Elastično područje je opisano modulom elastičnosti i Poissonovim koeficijentom.

Tablica 3. Svojstva materijala potrebna za opisivanje njegovog elastičnog područja [14]

E (N/mm^2)	v (-)
73000	0,33

2.2.2. Rubni uvjeti

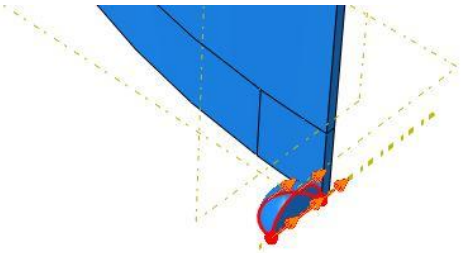
U eksperimentu su korištene pravokutne ploče, uklještene pomoću 16 vijaka. U numeričkom modelu to je modelirano pomoću uklještenja ploče na vanjskoj površini (Slika 10.). Kod modela u kojemu se koristi samo ¼ modela postaviljeni su rubni uvjeti kojima smo opisali simetriju modela po dvije osi (onemogućena je smo translacija u jednom smjeru te rotacija oko dvije osi) (Slika 10.), dok je uklještenje na vanjskim rubovima ostalo kao kod cijelog modela.



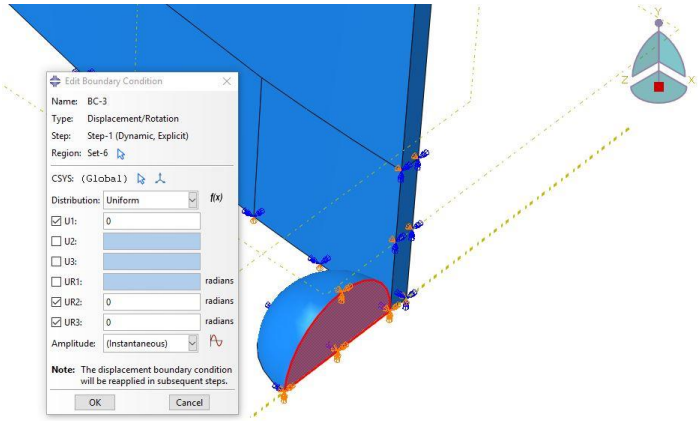
Slika 10. Rubni uvjeti na mjestu simetrije ploče

2.2.3. Opterećenje

Opterećenje predstavlja projektil koji svojom brzinom (tj. kinetičkom energijom) udara u ploču. Također je u simulaciji projektilu narinuto polje početne brzine u negativnom smjeru osi *Z* prema ploči, kao što je prikazano na Slici 11. Kao i kod ploče, u numeričkom modelu projektila korišteni su uvjeti simetrije identične rubnim uvjetima simetrije na ploči (Slika 12.). Projektil je izrađen od čelika gustoće 7800 kg/m^3.



Slika 11. Polje početne brzine projektila



Slika 12. Rubni uvjeti simetrije ploče

Parametri za Johnson Cook materijalni model projektila koji opisuju plastično područje nalaze se u tablici 4.

Tablica 4. Konstante za opisivanje plastičnog područja čelika [16]

A (MPa)	B (MPa)	C (-)	n (-)	m (-)	T_{melt} (K)	T_0 (K)
1430	2545	0,014	0,7	1,3	1793	293,2

Tablica 5. Konstante za opisivanje elastičnog područja čelika [16]

E (N/mm^2)	ν (-)
210000	0,3

2.2.4. Trenje

Trenje je u simulacijama uključeno kao karakteristika pri kontaktu površina s konstantnom vrijednošću faktora trenja μ od 0,63. Vrijednost je uzeta za slučaj da legura aluminija miruje dok se čelik giba [15].

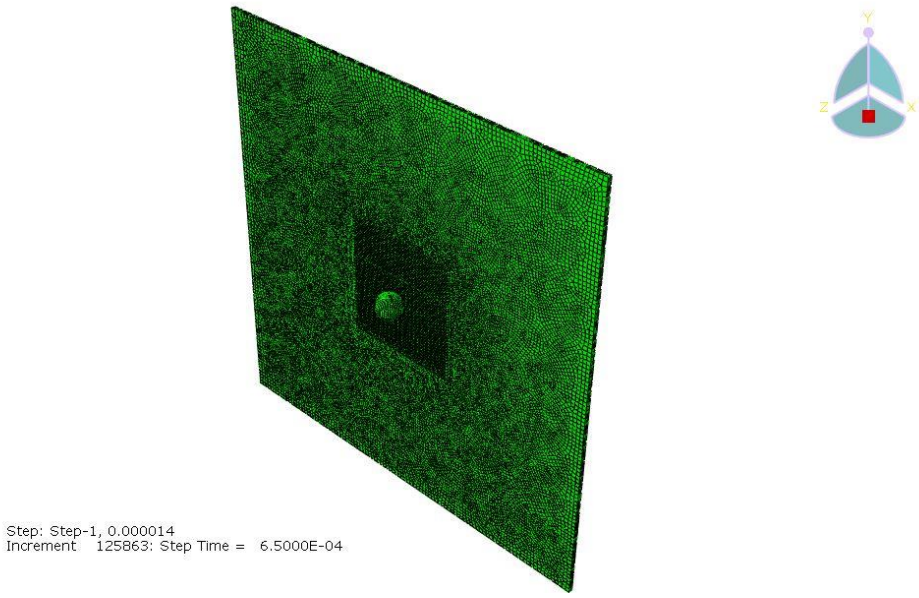
2.2.5. Kontakt

Kontakt između projektila i ploče definiran je tako da uključuje interakciju između svih površina projektila i ploče. To znači da projektil može doći u kontakt s vanjskim i unutarnjim površinama ploče (ako zbog popuštanja vanjskih površina unutarnje postanu vanjske te dođu u kontakt s projektilom). Također, prilikom popuštanja elemenata u slučaju izbijanja čepa dolazi

do interakcije između bočnih ploha koje su prije bile unutarnje i koje nisu bile u dodiru s projektilom. Početnim simulacijama uočeno je kako pri udaru projektila nije dolazilo do interakcije svih elemenata ploče sa projektilom. Dolazilo je do interakcije samo u prva 2 vanjska sloja elemenata. U input datoteci je izmjenom koda osigurano da dođe do interakcije svih slojeva elemenata ploče i projektila.

2.2.6. Mreža konačnih elemenata

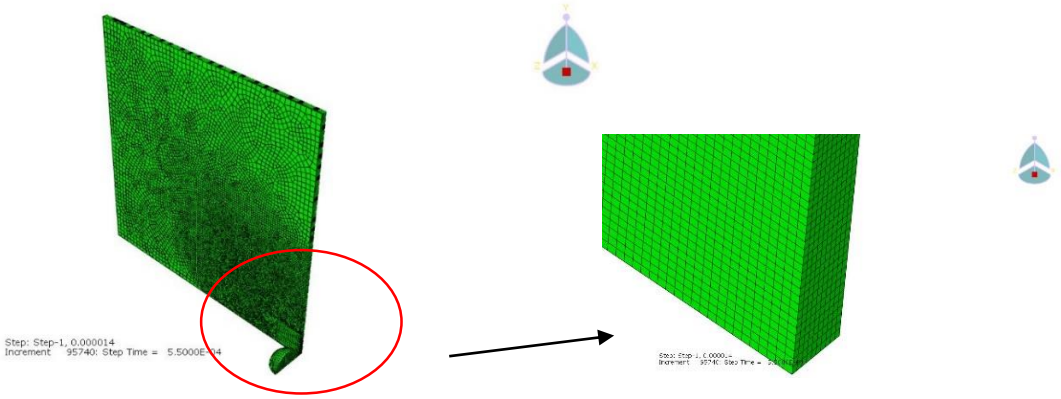
Mreža konačnih elemenata kugličnog projektila i ploče sastoji se od linearnih trodimenzijskih heksaedarskih konačnih elemenata oznake C3D8R. Ti elementi sastoje se od 8 čvorova s po tri stupnja slobode gibanja u svakom čvoru – tri pomaka u smjerovima glavnih osi koordinatnog sustava. Elementi su namijenjeni za reduciranu integraciju u jednoj točki koja se nalazi u središtu elementa zbog izbjegavanja problema kojeg elementi s punom integracijom imaju kod savijanja [10]. Mreža konačnih elemenata ploče debljine 2,03 mm i sferičnog projektila prikazana je na Slici 13.



Slika 13. Model ravne ploče s mrežom konačnih elemenata

Radi uštede računalnih resursa, mreža na vanjskom rubu je rjeđa u odnosu na područje oko mjesta udara projektila. Kako je udar projektila izrazito lokaliziran proces povećan je broj elemenata oko mjesta udara kako bi taj dio bolje opisali. Vanjskom dijelu ploče pridružen je manji broje elemenata kako bi skratili ukupno vrijeme simulacije. Kako je smanjen broj elemenata na ¼ od početnog, dodatno je povećan broj konačnih elemenata po debljini ploče. Po debljini ploče korišteno je 10 elemenata kako bi se dobili kvalitetniji rezultati. Mreža konačnih elemenata ploče sastoji se od C3D8R elemenata veličine od 0,2 mm do 1 mm. Gustoća

mreže najveća je u središtu ploče jer se na tom mjestu događaju najveće deformacije, s obzirom da tu projektil udara o ploču (Slika 14.).



Slika 14. Prikaz mreže na ravnoj ploči te uvećani dio ploče sa najgušćom mrežom

Konačni elementi korišteni za modeliranje projektila cilindričnog oblika (metci) su tetraedarski C3D10M (modificirani tetraedar s deset čvorova). Korišteni su jer C3D8R elementi ne opisuju metak na odgovarajući način radi njegovog oblika. Oni su elementi "modificirani" pomoću bilinearne interpolacije i stoga nisu pravi element drugog reda. U osnovi, to znači da C3D10M neće biti u stanju opisati zakrivljenost glatko kao i C3D10 elementi [10].

Tablica 6. Broj elemenata i čvorova u simulacijama

	Broj konačnih elemenata	Broj čvorova
LS-DYNA t=2,03mm[13]	225000	200000
Ravna ploča t = 2,03mm	146256	131110
Ploča radijusa zakrivljenosti 111,6 mm t = 2,03mm	294052	264060
Ploča radijusa zakrivljenosti 203,6 mm t = 2,03mm	254370	283360
Ravna ploča t = 2 mm	223859	246851
Ravna ploča t = 4 mm	342045	495876
Ravna ploča t = 6 mm	131165	216333
Ravna ploča t = 8 mm	209826	301070
Ravna ploča t = 10 mm	224279	247313
Ravna ploča t = 12 mm	382414	494036
Ravna ploča t = 20 mm	314305	406483
Udar pod kutom t = 5mm	209329	267952

U Tablici 4. dani su broj konačnih elemenata i čvorova koji su korišteni tijekom simulacija.

2.3.Validacija materijalnog modela ploče

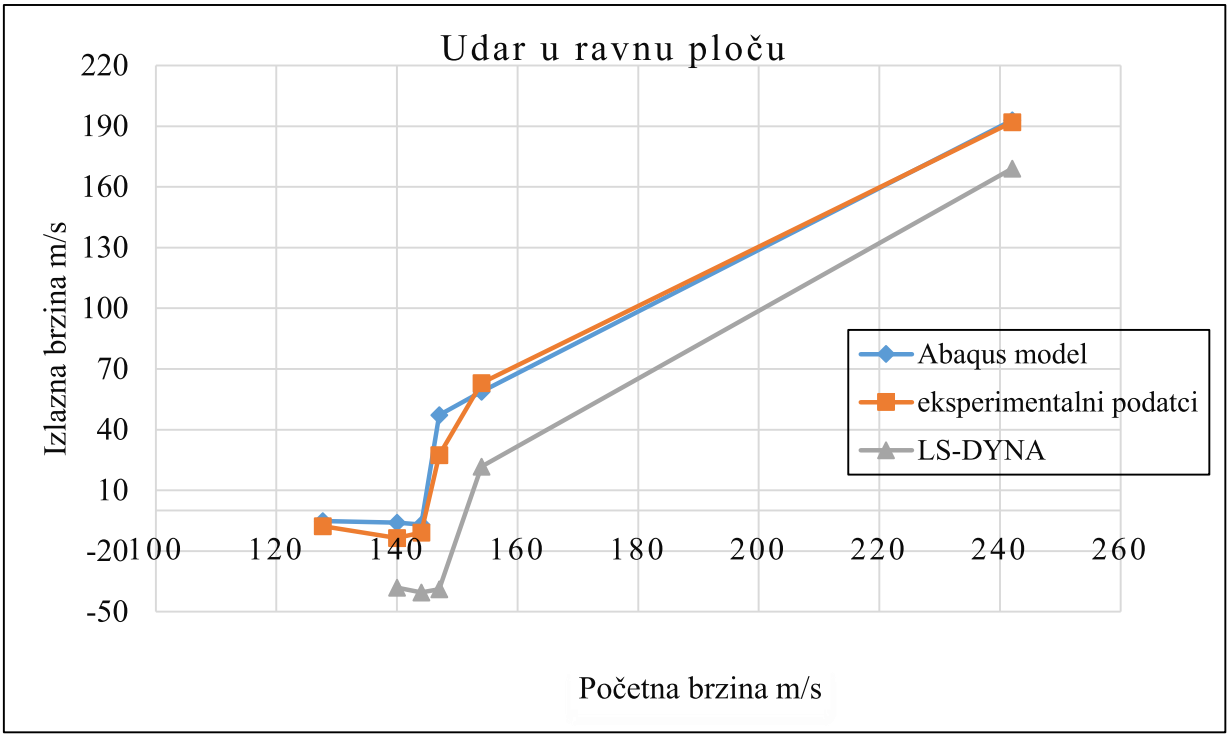
Validacija materijalnog modela ploče napravljena je usporedbom s eksperimentalnim rezultatima, ali i usporedbom s rezultatima dobivenim numeričkom metodom [13]. Za niz slučajeva početne brzine projektila izvedene su simulacije i dobivene balističke krivulje. Balističke krivulje su krivulje ovisnosti izlazne brzine projektila o ulaznoj brzini. Validaciju modela izvršili smo na tri vrste ploče: na ravnoj ploči, na ploči radijusa zakrivljenosti 111,6 mm te na ploči radijusa zakrivljenosti 203,2 mm. Simulacije su izvedene tako da su ulazne brzine projektila bile jednake ulaznim brzinama projektila izmjerenim pri eksperimentima, i korištenim u Ls-Dyna analizama [13] kako bi simulacije i eksperimenti mogli biti uspoređivani za pojedine slučajeve. Simulacije su izvođene u software-u Abaqus/Explicit, a usporedba je prikazana na Slikama 15, 16. i 17, te u Tablicama 7, 8. i 9. koje se nalaze u podpoglavljima 2.3.1, 2.3.2 i 2.3.3. U tablicama postoji određeni broj praznih polja. U dokumentu [13] pri usporedbi numeričkih i eksperimentalnih podataka nisu uspoređene identične brzine, nego su proizvoljno izabrane te su uspoređene krivulje. Također, u ovom radu nisu obavljene usporedbe svih brzina nego određeni dio kako bi se mogli usporediti dobiveni rezultate s rezultatima iz [13]. Ukupno je napravljena 21-na simulacija koja je u prosjeku trajala 6 h.

2.3.1. Udar u ravnu ploču

Pri udaru sferičnog projektila u ravnu ploču debljine t = 2,03 mm dobiveni su rezultati koji se nalaze u Tablici 7. i na Slici 15. Usporedbom dobivenih rezultata s eksperimentalno dobivenim rezultatima [13] i rezultatima također dobivenim numeričkom simulacijom se zaključuje kako odabrani model dobro opisuje promatranu problematiku u slučaju udara u ravnu ploču.

Tablica 7. Vrijednosti dobivenih i uspoređenih brzina za udar u ravnu ploču

Ulazna brzina (m/s)	Izlazna brzina (m/s) (Abaqus)	Izlazna brzina (m/s) (eksperi.) [13]	Izlazna brzina (m/s) LS-DYNA [13]
127,7	-7,2	-7,65	-
140	-9,98	-13,60	-38
144	28,20	-10,82	-40,48
147	49,3	27,42	-38,82
154	63,7	63	21,76
242	193,3	192	169,1



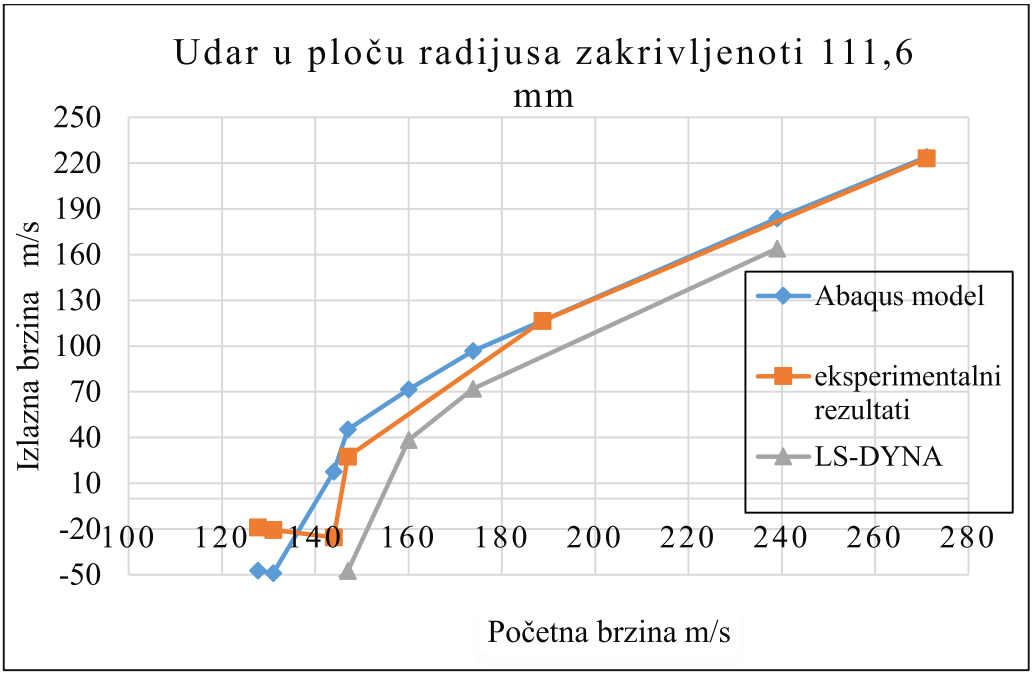
Slika 15. Usporedba rezultata udara u ravnu ploču

2.3.2. Udar u ploču radiusa 111,6 mm

Pri udaru sferičnog projektila u ploču radijusa zakrivljenosti 111,6 mm debljine t = 2,03 mm dobiveni su rezultati koji se nalaze u Tablici 8. i na Slici 16. Usporedbom dobivenih rezultata s eksperimentalno dobivenim rezultatima [13] i rezultatima također dobivenim numeričkom simulacijom se zaključuje kako odabrani model dobro opisuje promatranu problematiku u slučaju udara u zakrivljenu ploču kao i kod udara u ravnu ploču.

Tablica 8. Vrijednosti dobivenih i uspoređenih brzina za udar u ploču radijusa 111,6 mm

Ulazna brzina (m/s)	Izlazna brzina (m/s) (Abaqus)	Izlazna brzina (m/s) (eksperi.) [13]	Izlazna brzina(m/s) LS-DYNA [13]
127,7	-51,5	-18,86	-
131	-51,7	-20,69	-
144	24,70	-25,50	-55,5
147	46,9	27,43	-47,4
160	-	-	38,37
173,8	73,3	-	71,95
188,67	100,6	116,43	-
239	-	-	164
271	178	223,1	-



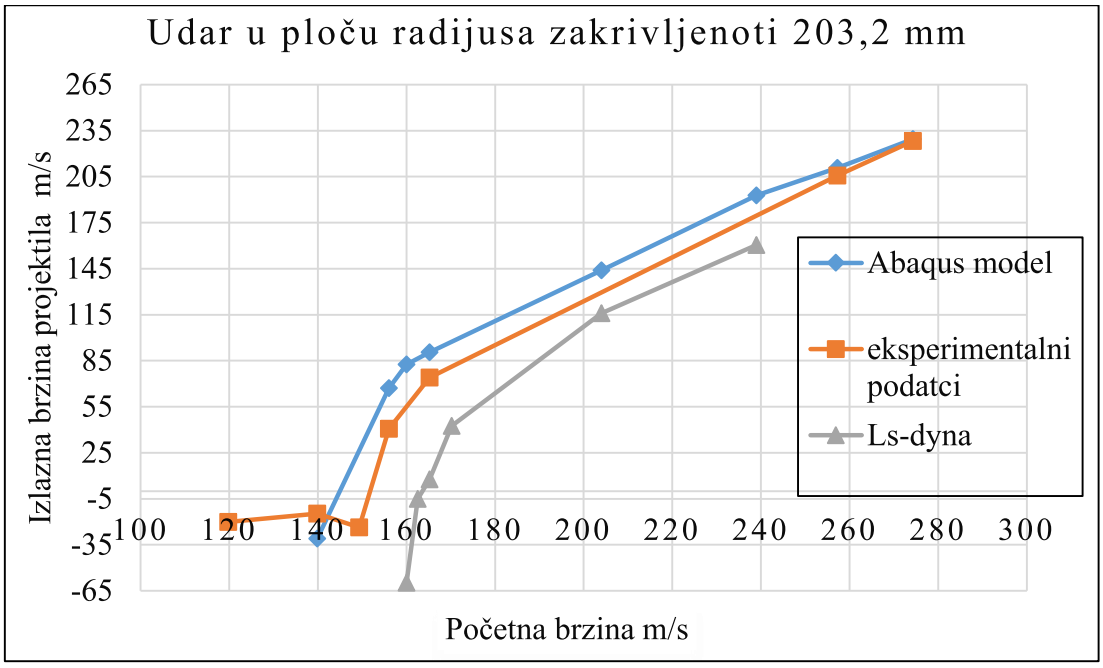
Slika 16. Usporedba rezultata udara u ploču zakrivljenosti 111,6 mm

2.3.3. Udar u ploču radijusa 203,2 mm

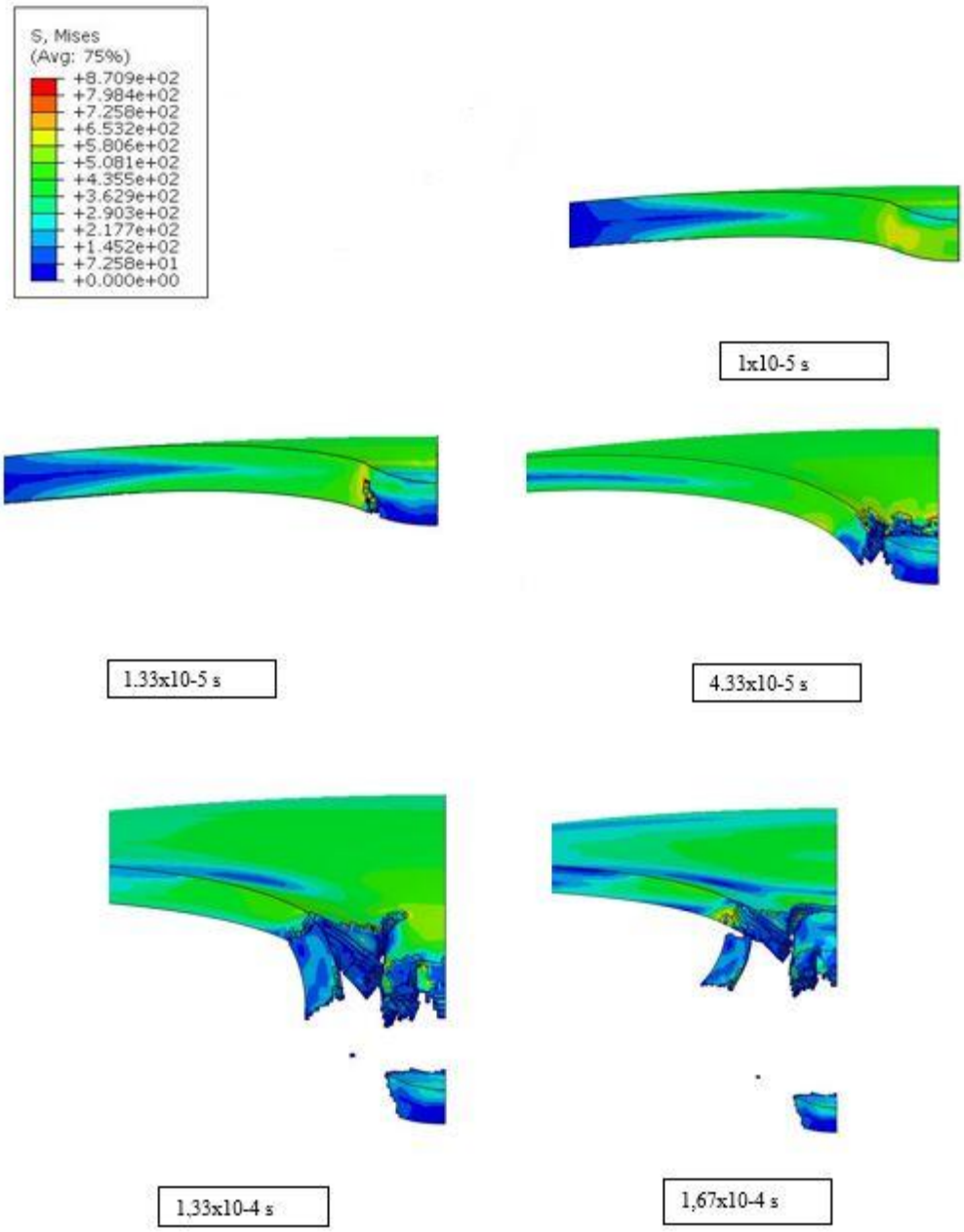
Pri udaru sferičnog projektila u ploču radijusa zakrivljenosti 111,6 mm debljine t = 2,03 mm dobiveni su rezultati koji se nalaze u Tablici 9. i na Slici 17. Usporedbom dobivenih rezultata s eksperimentalno dobivenim rezultatima [13] i rezultatima također dobivenim numeričkom simulacijom se zaključuje kako odabrani model dobro opisuje promatranu problematiku u slučaju udara u zakrivljenu ploču kao i kod udara u ravnu ploču.

Tablica 9. Vrijednosti dobivenih i uspoređenih brzina za udar u ploču radijusa 203,2 mm

Ulazna brzina (m/s)	Izlazna brzina (m/s) (Abaqus)	Izlazna brzina (m/s) (eksperi.) [13]	Izlazna brzina (m/s) LS-DYNA [13]
119,78	-	-20,11	-
139,9	-34,79	-14,59	-
149,35	-	-23,62	-
156,057	70,9	40,53	-
160,02	75,2	-	-59,71
162,56	-	-	-5,156
165,2	86,58	74,1	7,6
170,18	-	-	42,57
204	146,6	-	116
239	181	-	160,32
257,25	211,7	205,74	-
274,3	229,3	228,2	-

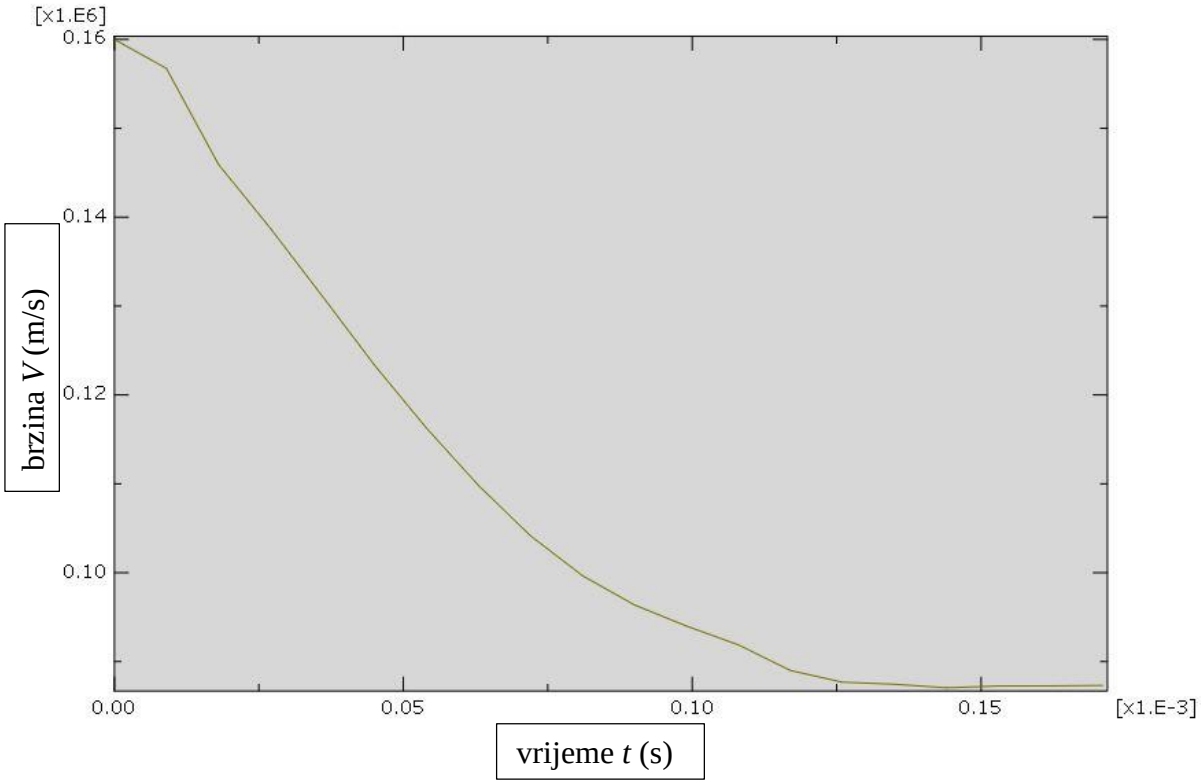


Slika 17. usporedba rezultata na ploči radijusa zakrivljenosti 203,6 mm



Slika 18. Von Mises naprezanja [MPa] tijekom probijanja zakrivljene ploče debljine 2 mm i radijusa zakrivljenosti 203,2 mm, projektilom početne brzine 160 m/s

Na Slici 18. prikazana su Von Mises naprezanja [MPa] i formiranje čepa pri udaru sferičnog projektila brzinom od 160 m/s u zakrivljenu Al ploču debljine 2,03 mm. Iz slike je uočljivo da je udar projektila jako lokaliziran događaj. Na slici nije prikazan projektil kako bi bolje uočili naprezanja u samoj ploči koja nastaju kada projektil u potpunosti penetrira kroz ploču. Tijekom interakcije brzina projektila se smanjuje radi disipacije kinetičke energije projektila što je prikazano na Slici 19. Brzina projektila je mjerena na čvorovima koji se nalaze u središtu projektila, na kojima se vrijednost izlazne brzine ustali u kraćem vremenskom periodu.



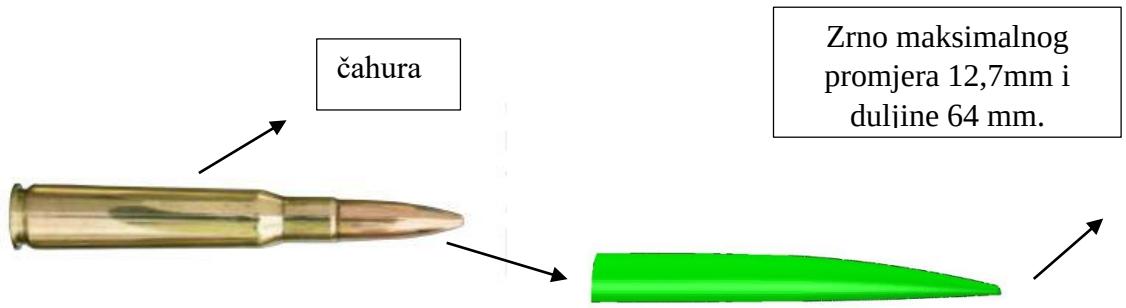
Slika 19. Promjena brzine projektila tijekom probijanja 2,03 mm debele ploče početnom brzinom od 160 m/s

Iz rezultata se uočava kako se podatci dobiveni simulacijom u Abaqus/ Explicit-u jako dobro podudaraju s eksperimentalnim rezultatima. Prema tome, može se zaključiti da korišteni numerički model, rubni uvjeti, algoritam za kontakt, te materijalni model dobro opisuju promatranu problematiku. Nadalje će model poslužiti za ispitivanje utjecaja na kritičnu brzinu probijanja.

3.UTJECAJI PARAMETARA PLOČE I PROJEKTILA NA UDAR

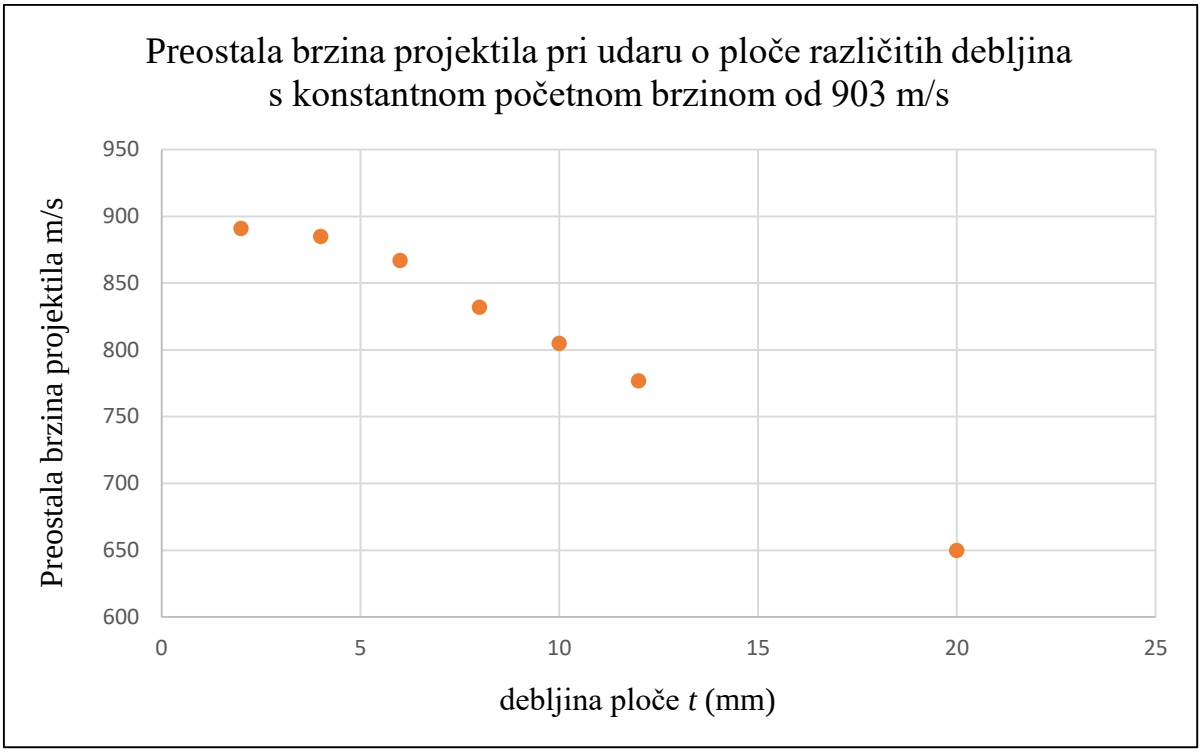
3.1. Utjecaj debljine ploče

Tijekom analize utjecaja debljine ploče na balističku krivulju napravljeno je sedam simulacija udara elastoplastičnog projektila kalibra 12,7 x 99 mm u Al ploču. U analizi su korištene ploče debljine od 2, 4, 6, 8, 10, 12, 20 mm te su im uspoređeni rezultati. Radi dugog trajanja analize, čije vrijeme računanja iznosi više od 24 h, nije napravljen veći broj simulacija. Razlog tako dugotrajne analize je u brzini projektila koja iznosi u početnom trenutku 903 m/s te je stabilni vremenski inkrement smanjen na $4 \cdot 10^{-10}$ s do $6 \cdot 10^{-10}$ s zbog velike distorzije konačnih elemenata. Ovim analizama simulirana je stvarna maksimalna početna brzina ovog kalibra čija je svrha penetriranje u oklope [17]. Tijekom analiza korišten je elastoplastični model projektila navedenog kalibra koji se koristi u svrhe protuavionske zaštite u sustavu NATO-a. Na Slici 20. prikazan je realan kalibar kao i CAD model koji je korišten za izradu numeričkog modela.



Slika 20. Kalibar 12,7 x 99 mm [17] te njegov CAD model

U ovoj analizi korišten je elastoplastični model projektila kalibra 12,7 X 99 mm čija masa samog projektila iznosi 45 g (Slika 20). Slika 21. prikazuje izlaznu brzinu projektila koji penetrira u materijal, te prolazi kroz njega. Uočava se da izlazna brzina pri probijanju aluminijske legure iznosi 650 m/s. Pri toj brzini projektil predstavlja veliku opasnost za posadu, elemente konstrukcije zrakoplova, te sustave koji omogućuju siguran let zrakoplova. Pri udaru projektila većega kalibra, kao što je korišten u simulacijama u ovom radu, dolazi do penetracije u ploče debljine i veće od 20 mm. Zaključeno je da ova legura aluminija nije u potpunosti adekvatna za balističku zaštitu zrakoplova. Iz dijagrama je uočeno da pad izlazne brzine s povećanjem debljine ploče nije linearan, ali se može smatrati linearnim u području između 6 i 20 mm.

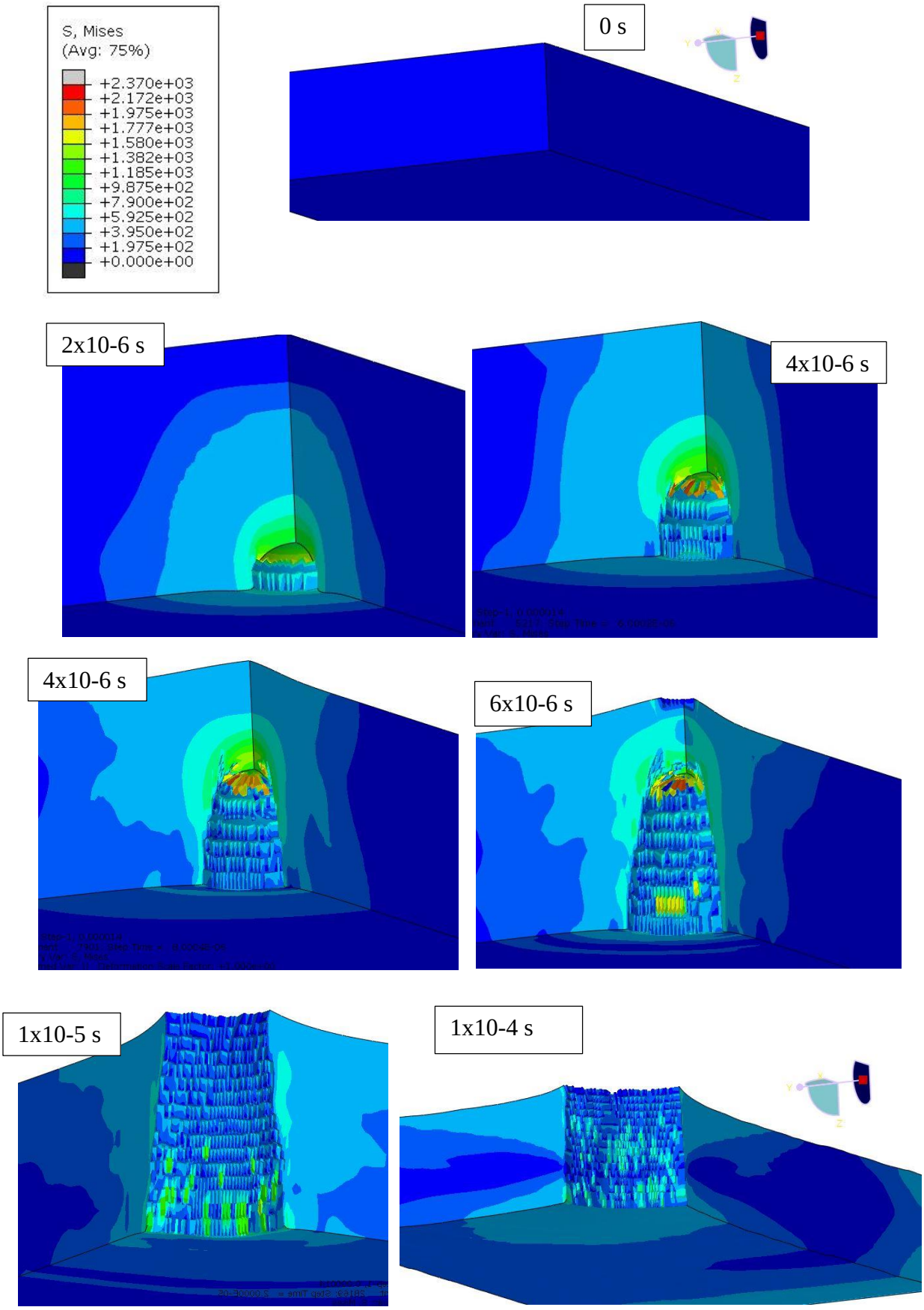


Slika 21. Utjecaj debljine ploče na preostalu brzinu projektila za Al

Vrijednosti izlazne brzine dane su u Tablici 10.

Tablica 10. Vrijednosti izlaznih brzina pri udaru u ploče različitih debljina

Debljina ploče d (mm)	Izlazna (preostala) brzina projektila V (m/s)
2	891
4	885
6	867
8	832
10	805
12	777
20	650



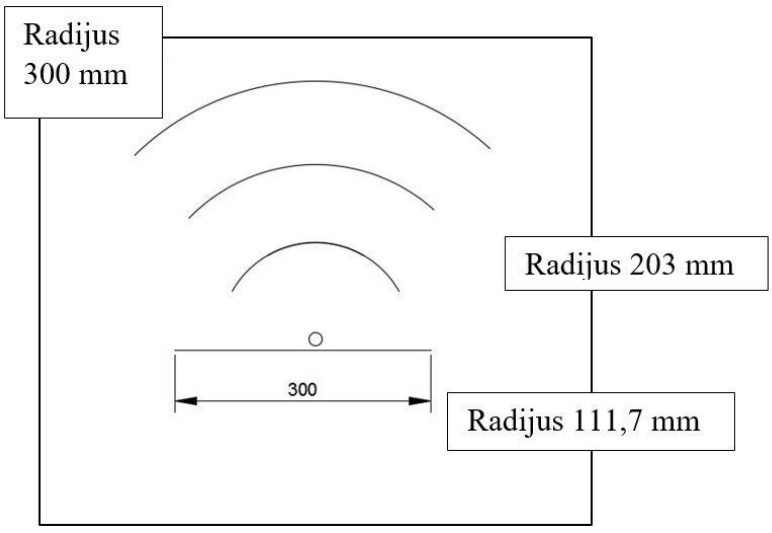
Slika 22. Von Mises naprezanja [MPa] tijekom probijanja Al ploče debljine 10 mm projektilom početne brzine 903 m/s

Na Slici 22. su prikazana Von Mises naprezanja [MPa] tijekom probijanja Al ploče debljine 10 mm projektilom početne brzine 903 m/s. Najveća naprezanja se pojavljuju tijekom početnog probijanja ploče vrhom projektila. U vremenskom intervalu od $4x10^{-6}$ s do $6x10^{-6}$ s je karakteristična fragmentacija na stražnjoj površini ploče uzrokovana refleksijom vala naprezanja na stražnjoj površini mete ploče [8]. Projektil je tijekom udara penetrirao u ploču te radijalno širio provrt.

3.2. Utjecaj zakrivljenosti ploče

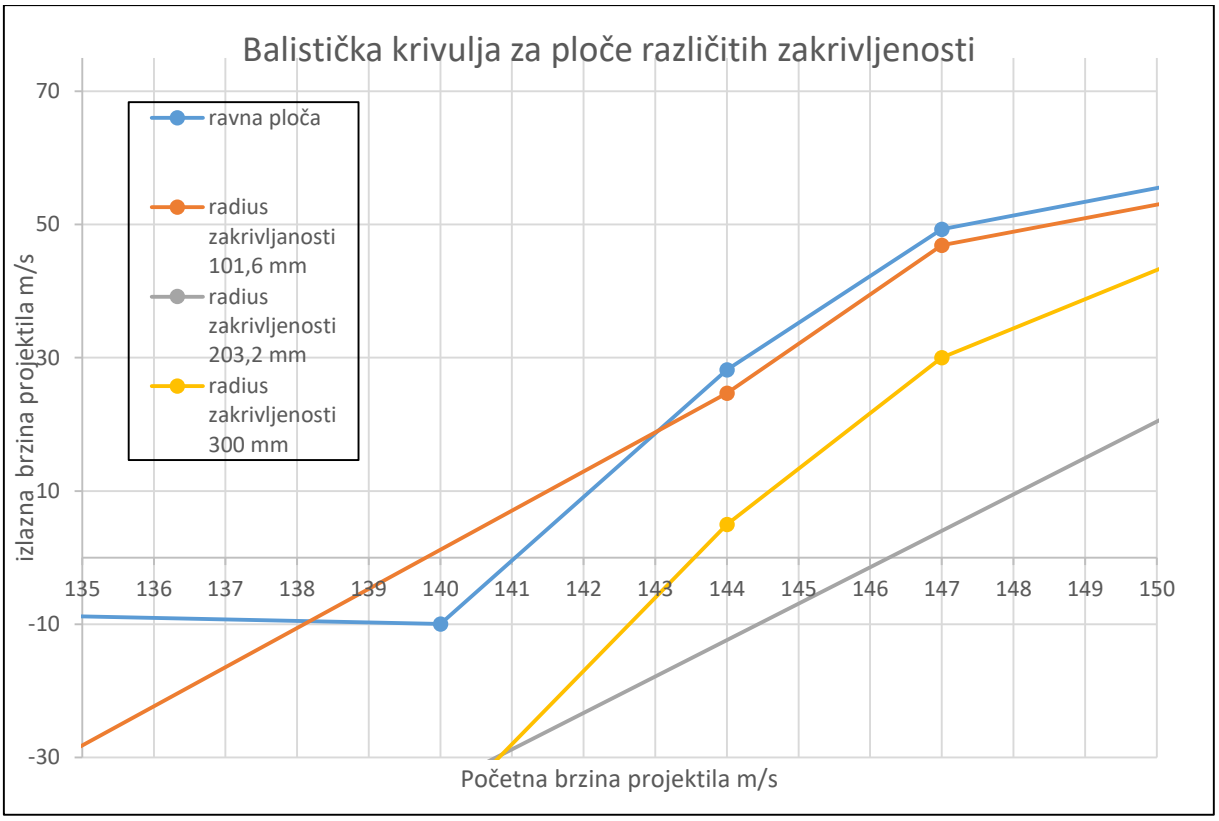
U ovom poglavlju cilj je istražiti učinke zakrivljenosti ploče na balistički udar. Kako bi se to izvelo, simulirani sudari projektila u ploče različitih zakrivljenosti pri različitim brzinama. Na temelju dobivenih rezultata dobivene su balističke krivulje iz kojih su se mogli donijeti zaključci o učinku zakrivljenosti na balističke performanse dijelova konstrukcije izrađene od aluminijskih legura. U ovom poglavlju korišteni su materijali čija su mehanička svojstva i parametri Johnson-Cook modela dani u Tablicama 1, 2, 3, 4 i 5.

Numerički modeli ploča su u ovom poglavlju simuliraju četiri ploče legure aluminija različitih zakrivljenosti. Radijusi zakrivljenosti tih ploča iznose 300mm, 203mm, 111,7mm, te ravna ploča beskonačnog radijusa. Ove zakrivljenosti su odabrane kako bi ih mogli usporediti sa eksperimentalnim rezultatima [13], i kako bi ispitali zakrivljenosti koje bi se mogle naći na određenim pozicijama na konstrukciji zrakoplova. Ploče manjih radijusa zakrivljenosti simuliraju dijelove konstrukcije nosnog dijela trupa borbenog zrakoplova i napadnog ruba krila, dok se veći radijusi se mogu koristiti na trupu i za zaštitu pilota (Slika 3.). Na Slici 23. je prikazana vizualna usporedba zakrivljenosti tih ploča.



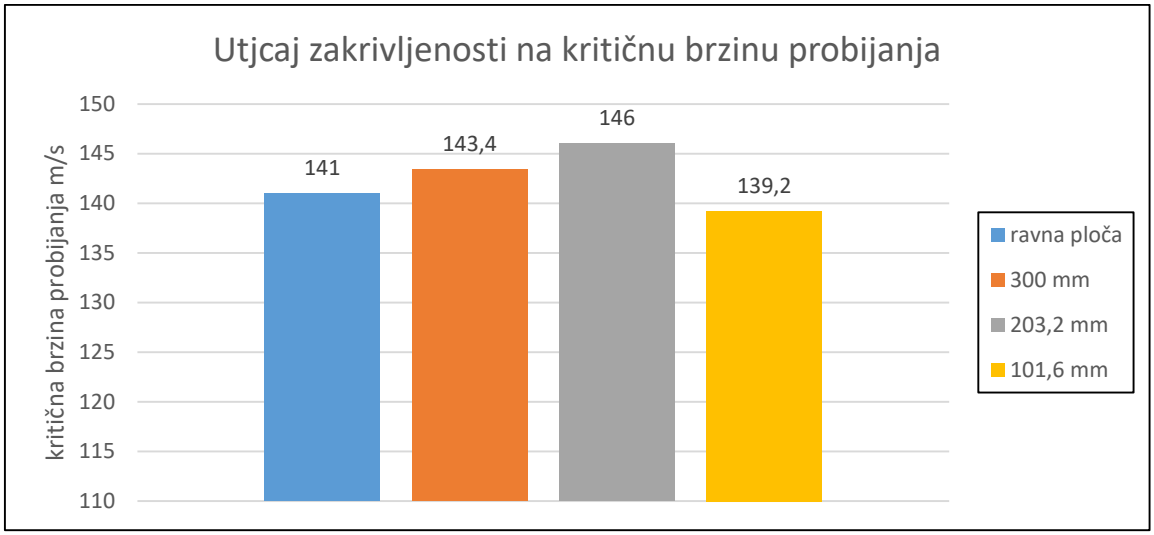
Slika 23. Usporedba zakrivljenosti 4 ploče legure aluminija

Balističke krivulje za svaku zakrivljenost su dobivene nizom simulacija koje su u prosjeku trajale 6 h, te su njihovi rezultati prikazani na Slici 24. Tijekom izračuna granične brzine pobijanja proveden je niz simulacije s brzinama koje su s gornje i donje strane granične brzine probijanja te su ucrtane u dijagram iz kojeg su očitane granične brzine probijanja. Pri očitavanju može doći do pogreške, pokušano je istu svesti na najmanji mogući nivo, no to u ovome slučaju to nije niti nužno. Najveća moguća greška pri očitavanju brzine iz dijagrama svedena je na 0,1 m/s, a točnost očitavanja brzina iz Abaqus sustava iznosi 0,5 m/s zbog vibracija čvorova numeričkog modela projektila. Slika 24. je samo detalj cjelokupne balističke krivulje koji je prikazan kako bi se bolje uočila kritična (granična) brzina probijanja.



Slika 24. Numerički dobivene balističke krivulje za ploče različitih zakrivljenosti

Kritična brzina probijanja za svaki model je dobiven je očitavanjem vrijednosti iz dijagrama balističke krivulje. Dobivene vrijednosti kritičnih brzina probijanja za zadane zakrivljenosti su prikazane na Slici 25.



Slika 25. Numerički izračunata kritična brzina probijanja za ploče različite zakrivljenosti

Iz dijagrama se uočava da krivulja ne raste konstantno sa povećanjem zakrivljenosti ploče. Vrijednost kritične brzine probijanja povećavati će se do određene zakrivljenosti kada ponovo počinje opadati. Sa Slike 25. se uočava da ploča radijusa zakrivljenosti203,2 mm ima najbolja svojstva sa stajališta zaštite posade a ploča radijusa zakrivljenosti 101,6 mm najlošija. Zaključeno je da je u svrhu zaštite posade potrebo koristiti konstrukciju određene zakrivljenosti u cilju povećanja balističke otpornosti. Ovi rezultati su potvrđeni i u [13] gdje rezultati također ne rastu linearno s promjenom zakrivljenosti, već im kritična brzina probijanja nakon određenog povećanja zakrivljenosti počinje opadati. Sa stajališta kritične brzine probijanja moguće je odrediti optimalnu zakrivljenost za izvedbu balističke zaštite zrakoplova.

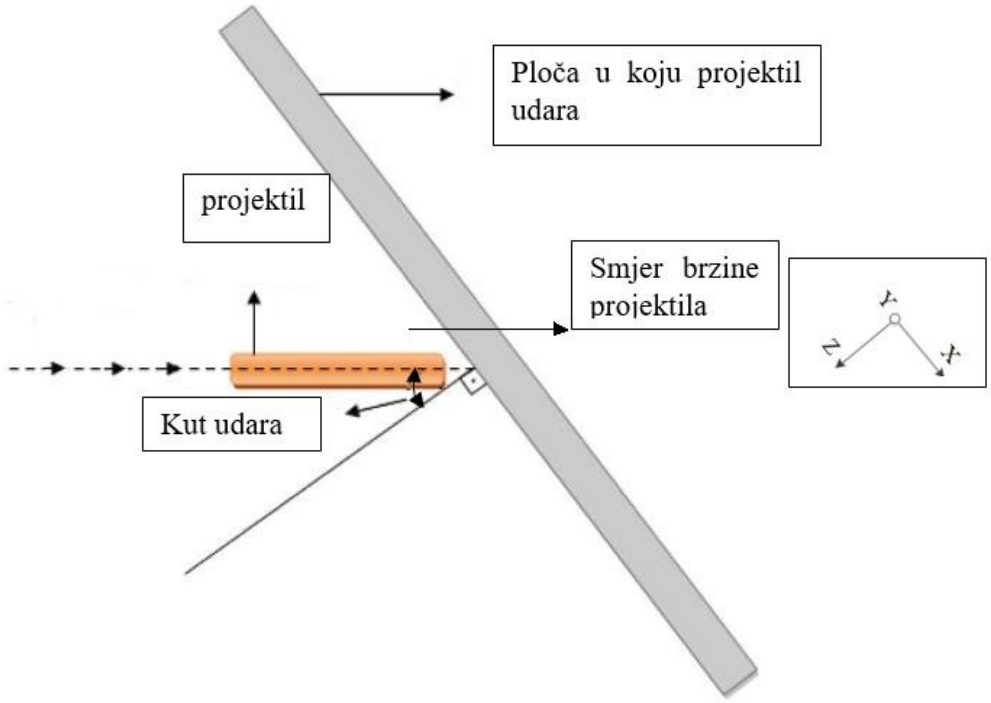
3.3. Utjecaj kuta udara

Koristeći postojeći materijalni model ploče i projektila izveden je niz simulacija u kojima je ispitan kuta udara. Kako bi simulacija trajala kraće od 15 h, odabran je manji kalibar projektila. Za projektil je odabran klasični projektil (metak) kalibra 5,56 x 45 mm koji je prikazan na Slici 26. Na slici je prikazana čahura i zrno, dok je u Abaqusu modelirano samo zrno.



Slika 26. Projektil kalibra 5,56 x 45 mm [17]

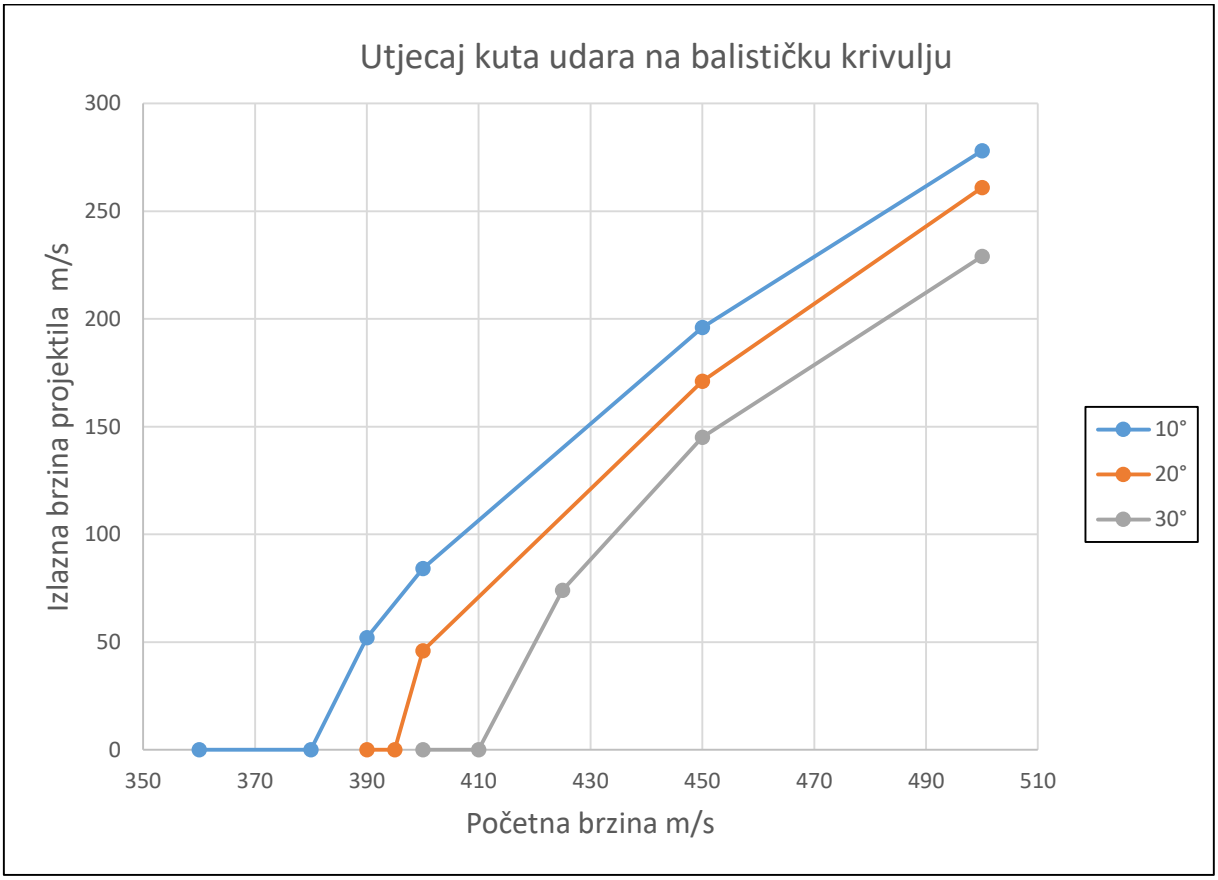
Izveden je niz simulacija pod različitim kutovima udara i pri različitim početnim brzinama kako bi se predvidjele balističke krivulje s ciljem analiziranja utjecaja kuta udara na balističku krivulju, odnosno graničnu brzinu probijanja ploče. Na Slici 27. prikazan je postav pri simulacijama koje su izvedene u svrhu utjecaja kuta udara na balističku krivulju.



Slika 27. Udar pod kutom – kut udara i koordinatni sustav

Utjecaj kuta pod kojim projektil udara u ploču na balističku krivulju ispitan je nizom simulacija (16 simulacija; prosječno trajanje 7 sati; vrijeme probijanja 2 ms) u kojima je projektil postavljen u položaj gdje mu je uzdužna os pod određenim kutom na normalu ploče (Slika 27). Pošto su glavne osi koordinatnog sustava projektila zarotirane za određeni kut u odnosu na koordinatni sustav sklopa potrebno je projektilu zadati projekcije brzine na koordinatne osi *X* i *Z* kako bi rezultantna brzina iznosila željenoj ukupnoj brzini u uzdužnoj osi projektila. Također, simuliran je slučaj u kojem projektil u početnom trenutku ne udara samim vrhom u metu, tj. udara svojom bočnom stranom u metu. Kod tog slučaja zarotiran je projektil za određeni kut i zadana mu je brzina u smjeru globalnog koordinatnog sustava.

Pri udaru vrha projektila u ploču pod kutom napravljeno je niz simulacija pri kojima je projektil postavljen u početnom položaju pri tri različita kuta. Simulacije su izvedene za kutove 10°, 20° i 30° mjerene u odnosu na normalu ploče, prema Slici 27. Balističke krivulje su prikazane na Slici 28.



Slika 28. Balističke krivulje u ovisnosti o kutu udara projektila

Tablica 11. Podatci ulaznih i izlaznih brzina za kut udara od 10°

Ulazna brzina projektila V (m/s)	Izlazna (preostala) brzina projektila V (m/s)
500	278
450	196
400	84,1
390	52
380	0
360	0

Tablica 12. Podatci ulaznih i izlaznih brzina za kut udara od 20°

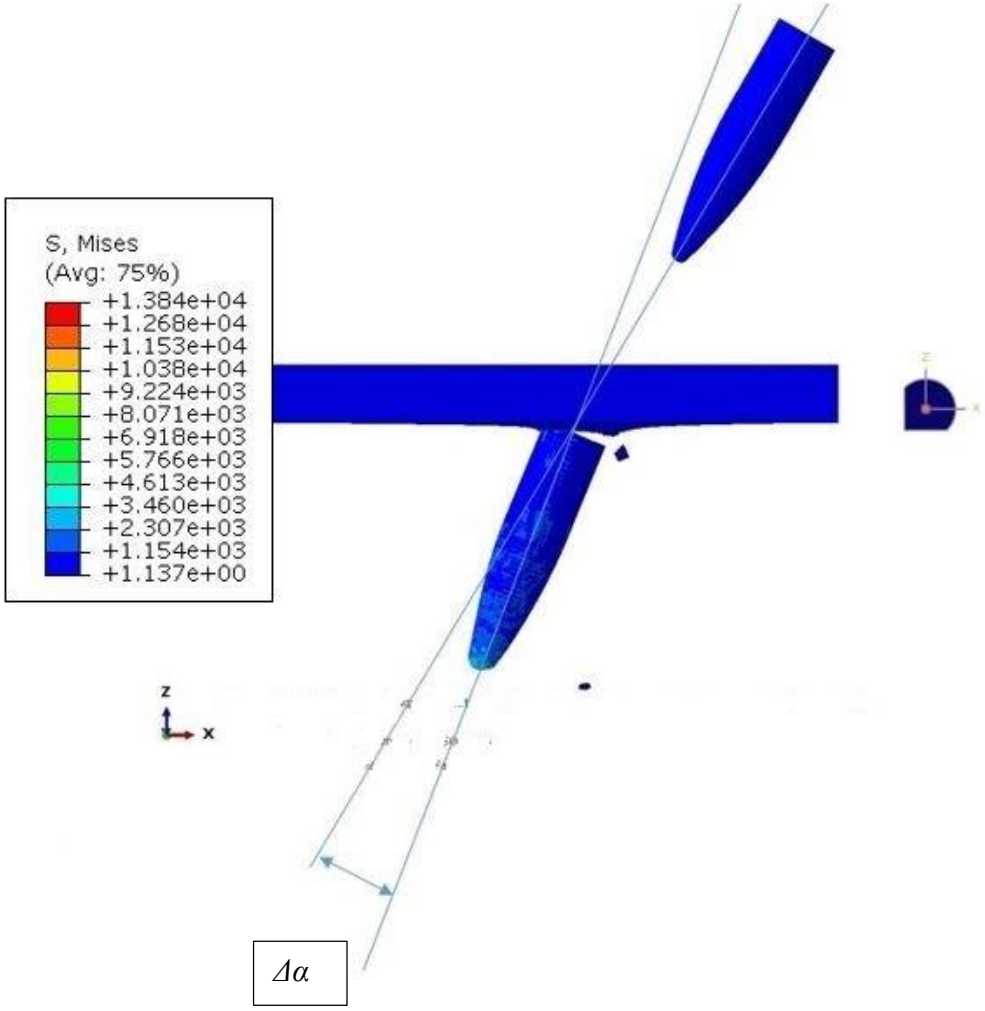
Ulazna brzina projektila V (m/s)	Izlazna (preostala) brzina projektila V (m/s)
500	261
450	171
400	46
395	0
390	0

Tablica 13. Podatci ulaznih i izlaznih brzina za kut udara od 30°

Ulazna brzina projektila V (m/s)	Izlazna (preostala) brzina projektila V (m/s)
500	229
450	145
425	74
410	0
400	0

Vidljivo je kako se s porastom kuta udara smanjuje izlazna brzina projektila, odnosno granična brzina probijanja raste. Povećanje granične brzine probijanja je posljedica povećanja efektivne debljine ploče t_{efekt}, čime se također povećava površina ploče u kontaktu između ploče i projektila. Uslijed povećane debljine, ali i interakcije površina dolazi do povećanja disipacije kinetičke energije projektila te time i smanjenje njegove brzine.

Prilikom penetracije projektila u ploču dolazi do rotacije projektila, koji rotira prema normali na ploču. Rotacija projektila događa se nakon što vrh projektila probije ploču nakon čega ostaje u kontaktu s unutrašnjom površinom ploče koja je u smjeru bočne komponente brzine projektila. Pri tome ga taj kontakt usmjerava u smjeru normale na površinu i smanjuje mu izlazni kut. Rotacija projektila je u skladu sa literaturom [6], gdje autori navode da projektil može promijeniti smjer, uobičajeno prema normali na površinu mete. Položaji projektila prije i nakon udara prikazani su na Slici 29.



Slika 29. Von Mises naprezanja [MPa] pri skretanju projektila početne brzine 500 m/s koji udara u ploču legure aluminija debljine 5 mm pod utem od 30 °

Vrijednosti izlaznog kuta u ovisnosti o brzini projektila i kuta udara projektila dani su u Tablicama 14., 15. i 16. Na mjestima gdje nisu upisane vrijednosti izlaznog kuta nije došlo do proboja ploče.

Tablica 14. Podatci ulaznih brzina i izlaznog kuta projektila za početni kut udara od 10°

Ulazna brzina projektila V (m/s)	Izlazni kut projektila α_i(°)
500	7
450	5,5
400	3,5
390	2
380	-
360	-

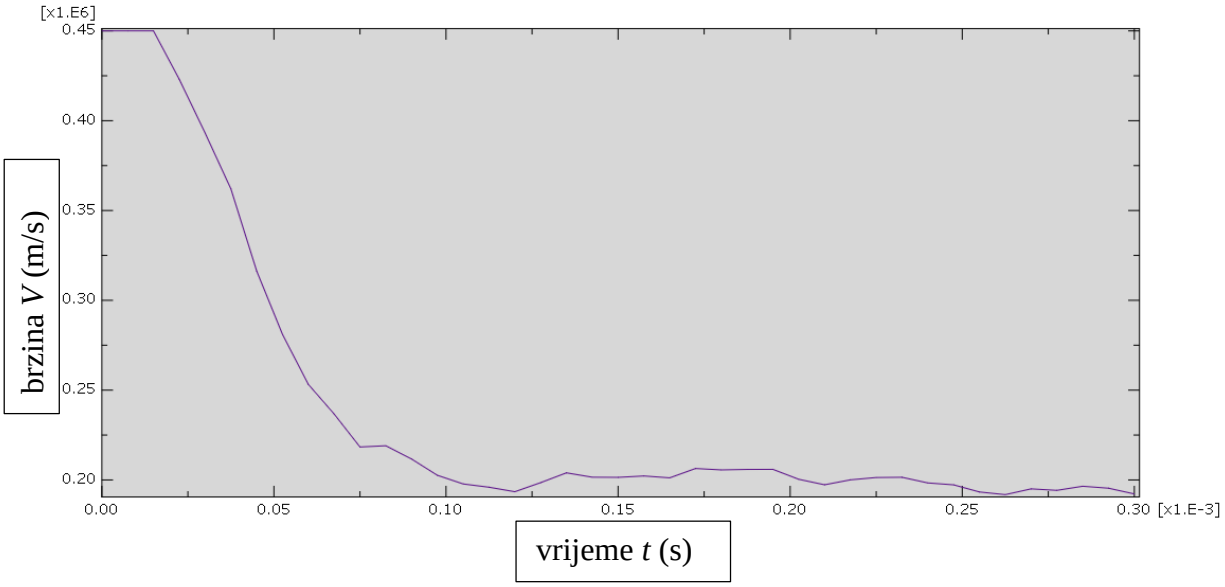
Tablica 15. Podatci početnih brzina i izlaznog kuta projektila za početni kut udara od 20°

Početna brzina projektila V (m/s)	Izlazni kut projektila α_i(°)
500	14
450	12
400	6,5
395	-
390	-

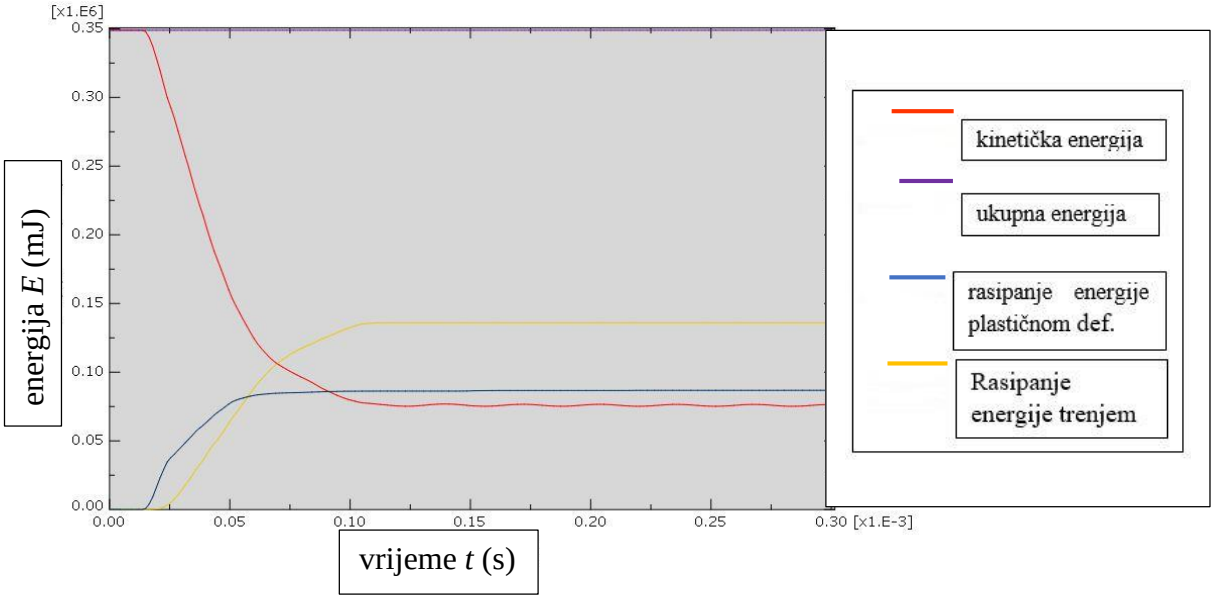
Tablica 16. Podatci početnih brzina i izlaznog kuta projektila za početni kut udara od 30°

Početna brzina projektila V (m/s)	Izlazni kut projektila α_i(°)
500	22
450	15
425	10
410	-
400	-

Iz simulacije i Slike 30. je vidljivo smanjenje brzine projektila koje je najizraženije do prolaska konusa projektila kroz stražnju površinu mete. To je potvrđeno i iz dijagrama promjene energija gdje se kinetička energija smanjila većinskim dijelom do trenutka kada konusni dio projektila probija zadnju površinu mete. Slika 31. prikazuje promjenu energije tijekom simulacije.

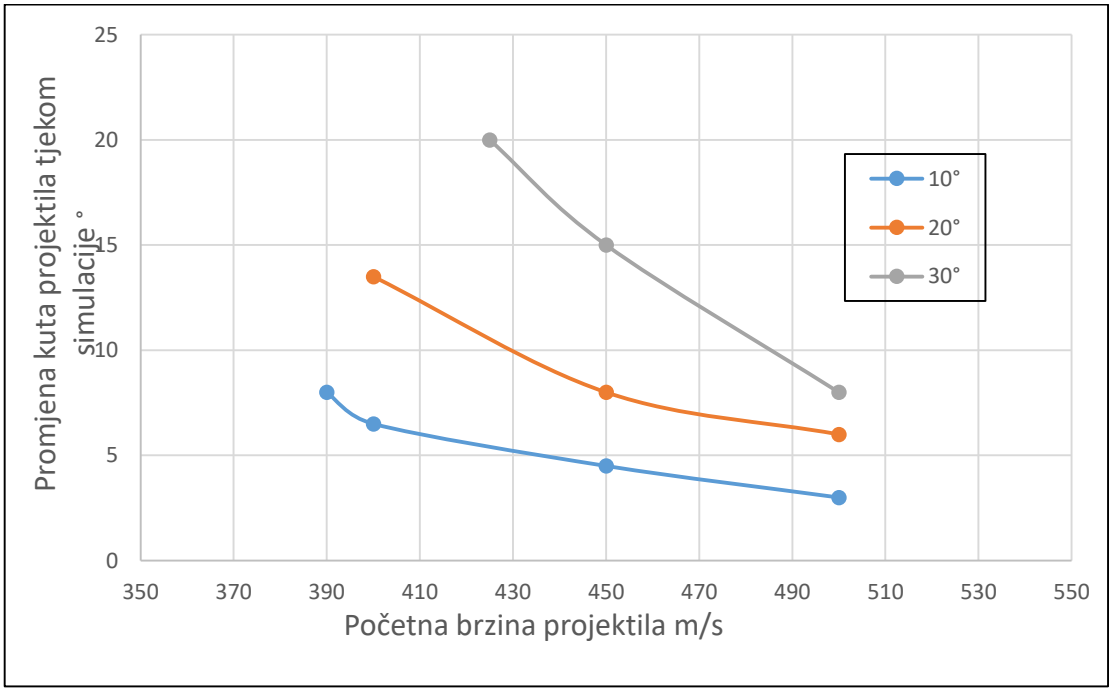


Slika 30. Promjena brzine projektila tijekom udara u ploču debljine 5 mm početnom brzinom od 450 m/s i kutom udara od 10°



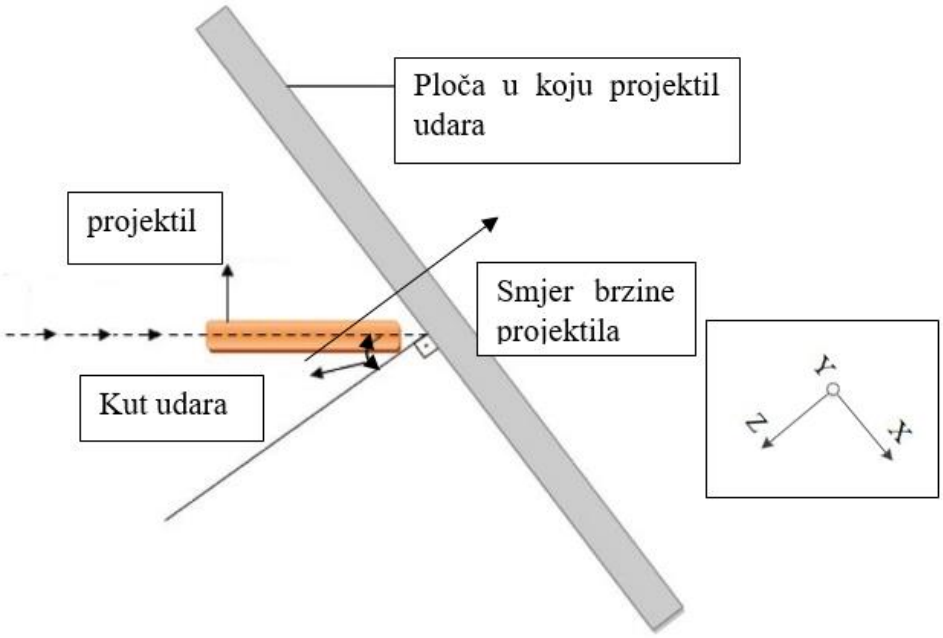
Slika 31. Prikaz promjena energija tijekom udara projektila pod kutom udara od 10° i početnom brzinom projektila od 450 m/s u Al ploču debljine 5 mm

Iz tabličnih vrijednosti vidljivo je kako sa smanjenjem početne brzine povećava skretanje projektila. Također, iz Slike 32., koja prikazuje utjecaj početne brzine i početnog kuta udara na promjenu kuta tijekom probijanja ploče, može se zaključiti da povećanjem kuta udara dolazi i do povećanja rotacije projektila tijekom proboja ploče.



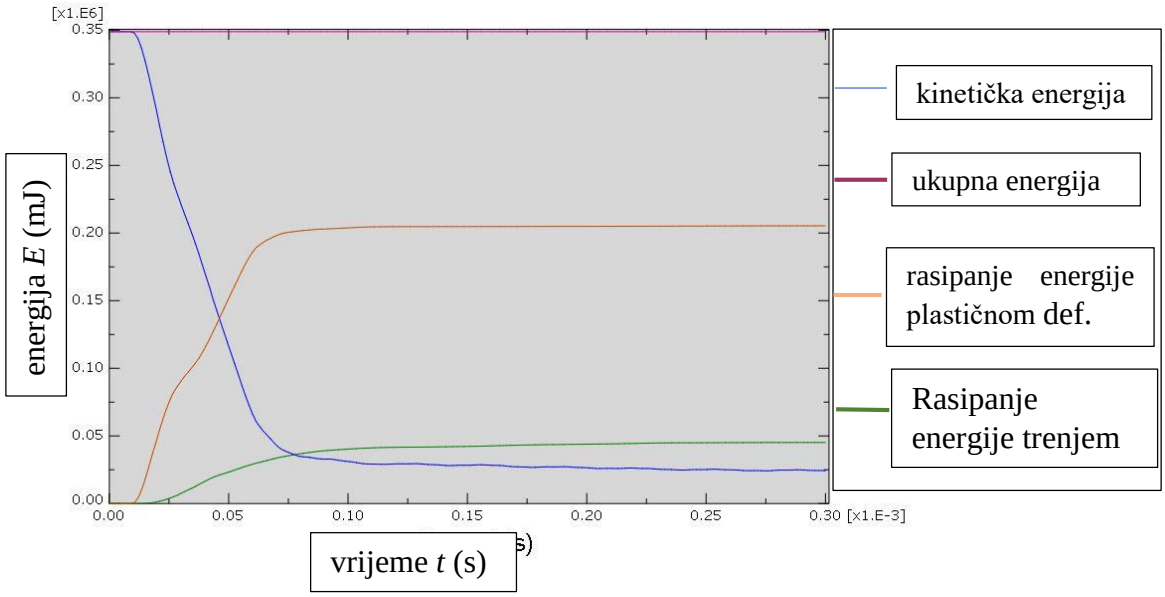
Slika 32. Utjecaj početne brzine i početnog kuta udara α na promjenu kuta tijekom probijanja ploče

Prilikom udara kod kojeg vektor brzine projektila ne podudara s uzdužnom osi projektila (Slika 33.) dolazi do veće disipacije kinetičke energije projektila što je prikazano na Slici 34. Uočava se kako projektil udara svojom bočnom površinom o ploču čime se povećava površina s kojom projektil udara u ploču.



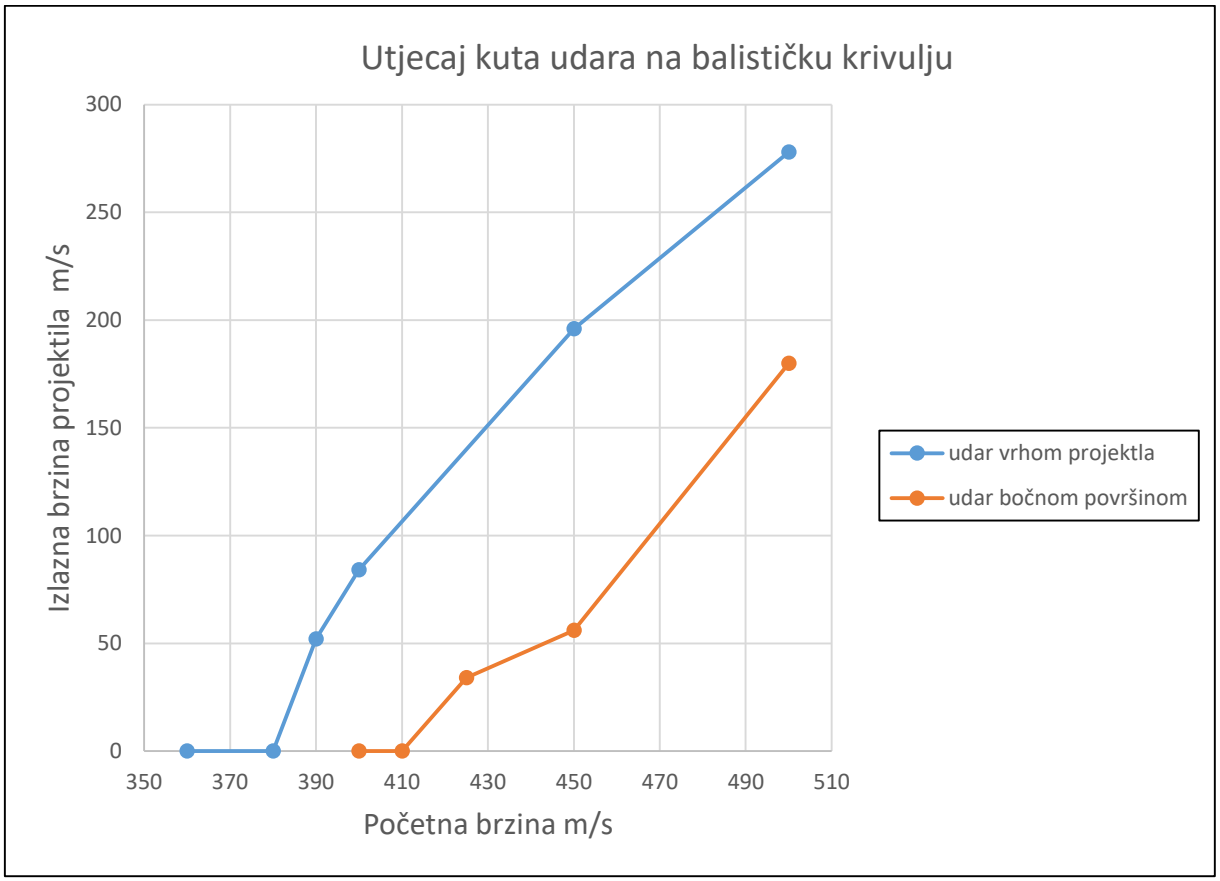
Slika 33 . Udar pod kutom – kut udara i koordinatni sustav

Slika 33. prikazuje promjene energija tijekom udara projektila bočnom površinom o ploču.



Slika 34. Prikaz promjena energija tijekom udara projektila bočnom površinom pod kutom udara od 10° i početnom brzinom projektila od 450 m/s u ploču legura aluminija debljine 5 mm

Iz prikaza promjene energija tijekom numeričke analize na Slici 34 se može zaključiti da ukupna energija ostaje konstantna te nije došlo do numeričkih grešaka u analizi. Usporedbom Slika 31. i 34. je zaključeno kako kod udara projektila bočnom površinom dolazi do velikog povećanja disipacije kinetičke energije putem plastične deformacije projektila i ploče u odnosu na udar vrhom projektila. Kako dolazi do veće disipacije kinetičke energije, dolazi do većeg smanjenja izlazne brzine projektila što je potvrđeno rezultatima na Slici 35.



Slika 35. Balističke krivulje udara projektila o ploču debljine 5 mm m/s bočnom površinom i vrhom projektila pri početnim kutem udara od 10 °

ZAKLJUČAK

Numeričke simulacije mogu vrlo uspješno poslužiti za procjenu ponašanja konstrukcije prilikom balističkog udara. Kako bi se izbjegla skupa eksperimentalna ispitivanja, one mogu poslužiti pri konstruiranju balističke zaštite zrakoplova. Korištenjem određenih materijalnih modela može se vjerodostojno simulirati udar projektila u konstrukciju, što je i dokazano u ovom radu. Validacijom modela zaključeno je kako se simulacijom može vjerodostojno simulirati udar. Uočeno je kako je pri konstruiranju balističke zaštite potrebno odabrati konstrukciju odgovarajuće zakrivljenosti i odgovarajuće debljine kako bi zrakoplov bio pogodan za svoju misiju. Uočeno je da legura aluminija Al-2024T3 korištena u ovom radu ne zadovoljava potrebe balističke zaštite zrakoplovnih konstrukcija koje mogu biti izložene udarima stranih tijela velikom brzinom. Pri odabiru materijala bilo bi potrebno odabrati materijal boljih karakteristika poput titana [18], čija su mehanička svojstva puno veći od mehaničkih svojstava aluminijske legure analizirane u ovom radu. Također, bilo bi potrebno napraviti simulacije udara na kompozitima koji su često korišteni u zrakoplovnim konstrukcijama te vidjeti njihove karakteristike, no takva bi analiza prelazila okvire ovog diplomskog rada. U radu je zaključeno kako s konstantnim povećanjem zakrivljenosti ne doprinosimo otpornosti konstrukcije na balistički udar. Otpornost se povećava do određene zakrivljenosti nakon koje počinje opadati (Slika 23.). Pri konstruiranju zaštite bilo bi potrebno pomno odabrati zakrivljenost zaštite kako bi se uklopila u konstrukciju ostatka zrakoplova i imala najveću otpornost na udar. Debljina dijelova konstrukcije ima velik utjecaj na otpornost konstrukcije (Slika20.). Zaključeno je kako balistička krivulja kod koje je povećavana debljina konstrukcije nije linearna. Povećanjem debljine ploče značajno doprinosimo otpornosti konstrukcije na balističke udare, no povećanjem debljine se povećava masa zrakoplova čime se direktno utječe na njegove performanse. Konstruktori moraju iz željenih ciljeva pri konstruiranju odlučiti prioritete te donijeti odluke o debljini konstrukcije. U radu je ispitan i utjecaj udara projektila pod kutom. Uslijed povećanja poprečnog presjeka, kada projektil pod oštrim kutom udara svojim vrhom u ploču, dolazi do veće disipacije kinetičke energije projektila, a time i povećanja balističke granice konstrukcije. Kada projektil pod određenim kutom udara svojom bočnom površinom u ploču, dolazi do daljnjeg povećanja disipacije kinetičke energije ponajviše preko mehanizma plastične deformacije projektila i ploče (Slika 32.). U simulacijama je moguće napraviti dodatna poboljšanja, ponajviše korištenjem većeg broja konačnih elemenata, koji bi zahtijevali snažnija računala od onih koja su bila dostupna tijekom izrade ovog rada.

LITERATURA

[1] *TenCate Advance armour,* https://www.tencateadvancedarmor.com/ (14.4.2017)

[2]*Airpower Classics Zaur Eylanbekov,* http://www.airforcemag.com/MagazineArchive/Magazine%20Documents/2008/January%202008/0108classics.pdf ((14.4.2017.)

[3] *Vietnam helicopters,* http://www.vietnamhelicopters.org/uh-1h-huey/ (14.4.2017.)

[4]*AeroCroatia,* https://planewatcher.com/details.php?image_id=4742&sessionid=7u0fo5s9v0b3o7enh9mtn15mk2 (14.4.2017.)

[5] Colonel Timothy M. Laur and Steven L.Llanso, *Encyclopedia of modern U.S. military weapons* Berkley trade / July 1998

[6] D. E. Carlucci, S. S. Jacobson, *Ballistics Theory and Design of Guns and Ammunition*, Boca Raton, Taylor & Francis Group, 2014.

[7] Sai Kiran Cgelluru, *Finite element simulation of ballistic impacts on metal and composites plates*, B.E., Andhra University, 2004

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

[9] *Abaqus 6.13 Analysis User's Manual*

[10] *Abaqus 6.13 Theory Manual*

[11] *DG7YBN / Mechanics / Basis*, http://dg7ybn.de/Mechanics/Basics.htm (9.5.2017)

[12] B. Adams, *Simulation of ballistic impacts on armored civil vehicles* MT 06.03

[13] David Scott Stargel, Doctor of Philosophy, *Experimental and numerical investigation into the effects on panel curvature on the high velocity ballistic impact respons of aluminum and composite panels* .2005

[14] Office of Aviation Research Washington, D.C. 20591, *Failure Modeling of Titanium 6Al-4V and Aluminum 2024-T3 With the Johnson-Cook Material Model*

[15] G. Salomon, D. Mendeleev *Fundamentals of Sliding Friction,* Taylor & Francis Group, LLC, 2009

[16] Abaqus Technology Brief, *Simulation of the ballistic perforation of aluminum plates with Abaqus/Explicit*

[17] *Nammo ammunition handbook Edition 2,* Nammo, 2014.

[18] Guang Chen & Chengzu Ren & Xiaoyong Yang & Xinmin Jin & Tao Guo *Finite element simulation of high-speed machining of titanium alloy (Ti–6Al–4V) based on ductile failure model,* Springer-Verlag London Limited 2011

PRILOZI

I. CD-R disc