

Utjecaj eksplozivnog punjenja na učinkovitost konusnih eksplozivnih naboja

Žugec, David

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:246367>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-03**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
Preddiplomski studij rudarstva

**UTJECAJ EKSPLOZIVNOG PUNJENJA NA UČINKOVITOST KONUSNIH
EKSPLOZIVNIH NABOJA**

Završni rad

David Žugec
R4268

Zagreb, 2021.

UTJECAJ EKSPLOZIVNOG PUNJENJA NA UČINKOVITOST KONUSNIH EKSPLOZIVNIH NABOJA

David Žugec

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za rudarstvo i geotehniku
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

U radu su opisani su utjecajni čimbenici kumulativnih eksplozivnih naboja. Analiza utjecaja eksplozivnog punjenja na učinkovitost konusnih eksplozivnih naboja provedena je u programu AUTODYN. AUTODYN je korišten za simulaciju brzine mlaza kumulativnih perforatora sa dva različita eksplozivna punjenja te dubinu penetracije u ciljanom materijalu. Rad izrađen je u sklopu HR 14/2020 "Influence of Confinement on Detonation Parameters of ANFO explosives" bilateralna suradnja

Ključne riječi: kumulativni eksplozivni naboj, kumulativni perforator, eksplozivno punjenje, AUTODYN

Završni rad sadrži: 27 stranice, 5 tablica, 17 slika, 0 priloga, i 9 reference.

Jezik izvornika: Hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: Dr. sc. Vječislav Bohanek

Ocjenjivači: Dr. sc. Vječislav Bohanek, izvanredni profesor RGNF
Dr. sc. Mario Dobrilović, redoviti profesor RGNF
Dr. sc. Vinko Škrlec, izvanredni profesor RGNF

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. KUMULATIVNI NABOJI	2
2.1. Munroeov efekt.....	4
3. KONUSNI KUMULATIVNI NABOJI	5
3.1. OBLOGA.....	7
3.2. Eksplozivno punjenje.....	8
3.3. Kućište	9
4. PRIMJENA KONUSNIH KUMULATIVNIH EKSPLOZIVNIH NABOJA.....	10
5. UTJECAJ EKSPLOZIVNOG PUNJENJA NA UČINKOVITOST KONUSNIH KUMULATIVNIH EKSPLOZIVNIH NABOJA	13
5.1. Izrada modela u AUTODYN-u	13
5.2. Simulacija brzine mlaza.....	16
5.3. Simulacija brzine mlaza.....	18
6. ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA.....	20
7. ZAKLJUČAK	21
8. LITERATURA.....	22

POPIS SLIKA

Slika 2-1 Kumulativni perforator (Martin 2021).....	3
Slika 2-2 Kumulativni rezač (Martin 2021)	3
Slika 2-3 Konstrukcija kumulativnog naboja Charles E. Munroea (Bohanek 2013).....	4
Slika 3-1 Presjek konusnog kumulativnog naboja	5
Slika 3-2 Rušenje obloge i nastanak mlaza (Elshenawy, 2012).....	6
Slika 3-3 . Princip djelovanja eksplozivnih kumulativnih naboja (Bohanek 2013).....	7
Slika 5-1 Model za simulaciju brzine mlaza	14
Slika 5-2 Model za simulaciju penetracije mlaza.....	14
Slika 5-3 Odabrane mreže	15
Slika 5-4 Postav sa sensorima	17
Slika 5-5 3D prikaz mlaza	17
Slika 5-6 Brzine mlazova	18
Slika 5-7 Mlazovi kumulativnih perforatora, a) PEP 500, b) Emulzijski eksploziv	18
Slika 5-8 Mlazovi kumulativnih perforatora i mete, a) PEP 500, b) Emulzijski eksploziv	19
Slika 5-9 Oblik i duljina perforacije, a) PEP 500, b) Emulzijski eksploziv	19

POPIS TABLICA

Tablica 3-1 Prikaz različitih metala za oblogu kumulativnih naboja prema mogućnosti njihove primjene (Held 2001).....	8
Tablica 3-2. Eksplozivi koji se koriste za kumulativne naboje (Bohanek, 2008)	9
Tablica 5-1 Svojstva Cu obloge.....	15
Tablica 5-2 Svojstva korištenih eksploziva.....	16
Tablica 5-3 Svojstva čelika 1018.....	16

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
v	km/s, m/s	brzina
T	K	temperatura
ρ	g/cm ³	gustoća
p	kbar, kPa	tlak
σ_M	MPa	vlačna čvrstoća
E	GPa	modul elastičnosti
K	GPa	rasuti modul
G	GPa	modul smicanja

1. UVOD

Eksplozivi imaju široku primjenu u civilne i vojne svrhe. Najšira primjena istih je za pridobivanje mineralnih sirovina u rudarstvu kao i za potrebe različitih iskopa u građevinarstvu. Grupa postupaka koji se zajednički nazivaju obrada metala eksplozivom (engl, *explosive metalworking*) posebno je područje primjene energije eksploziva.

Kumulativnim eksplozivnim nabojima izvodi se rezanje ili perforiranje metala ili drugih materijala. Takva eksplozivna punjenja koriste se s ciljem usmjeravanja oslobođene energije eksploziva u točku ili pravac. Kumulativni eksplozivni naboji s ciljem usmjeravanja oslobođene energije u točku nazivaju se konusni kumulativni naboji ili perforatori, dok se oni s ciljem usmjeravanja energije u pravac nazivaju linearni, odnosno linijski kumulativni naboji.

Svrha konusnih eksplozivnih nabojna perforiranje je ciljanog materijala. Obloga kumulativnog prostora u obliku je konusa, a energija detonacije usmjerena je u točku. Njihova primjena najzastupljenija je u vojne svrhe i u naftnoj industriji

Linijski kumulativni naboji namijenjeni su za rezanje. Kumulativna im je obloga izdužena u pravcu dulje osi, a energija detonacije usmjerena u pravac. Koriste se u industriji kod određenih tehnologija rezanja metala.

2. KUMULATIVNI NABOJI

Eksplozivnim punjenjem (ili nabojem) uobičajeno se smatra neka količina eksplozivne tvari čijom se detonacijom obavlja rad: prilikom miniranja u rudarstvu i naftnoj industriji, oblikovanju i zavarivanju metalnih elemenata, rezanja i rušenja raznih objekata itd. S obzirom na oblik, eksplozivne naboje moguće je podijeliti u tri skupine:

- koncentrirani eksplozivni naboji,
- linijski eksplozivni naboji i
- kumulativni eksplozivni naboji (Sućeska 2001).

Koncentrirani eksplozivni naboji su oni eksplozivni naboji kod kojih je omjer između najduže i najkraće dimenzije manji od 3:1. Eksplozivni naboji kod kojih je omjer između najkraće dimenzije veći od 3:1, a omjer između kraćih dimenzija manji od 3:1 nazivaju se linijski ili izduženi eksplozivni naboji.

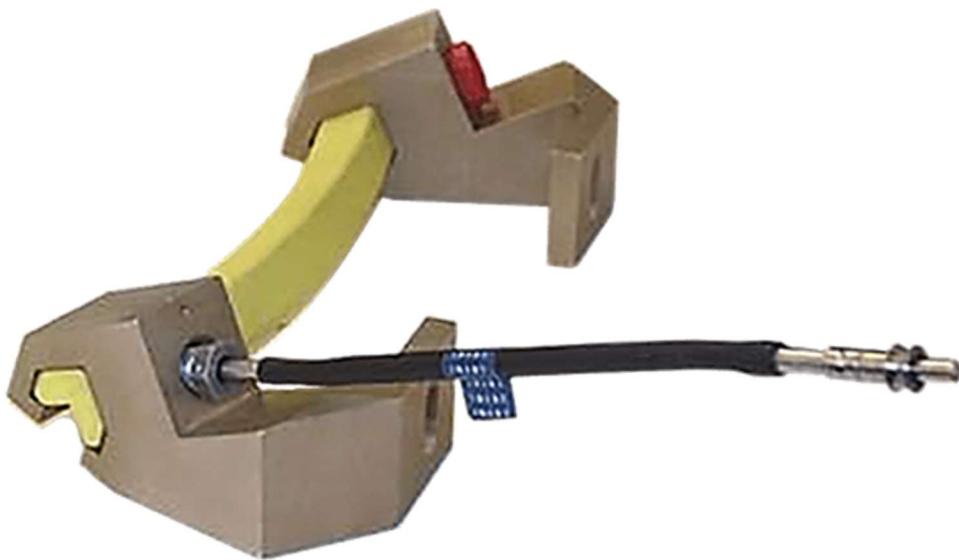
Kumulativni eksplozivni naboji karakteristični su jer posjeduju mogućnost usmjeravanja energije oslobođene detonacijom. Energija detonacije usmjerava se izradom kumulativnog prostora pravilnih dimenzija i oblika u eksplozivnom punjenju. Oblaganjem kumulativnog prostora tankim slojem metala pospješuje se jače djelovanje kumulativnog naboja. Metalna obloga izvor je teških molekula i povećava kinetičku energiju mlaza kumulativnoga naboja koji penetrira u ciljani materijal. Postavljanjem kumulativnog naboja na određenu udaljenost od ciljanog objekta dodatno se povećava djelovanje kumulativnih naboja.

Eksplozivni kumulativni naboji mogu se podijeliti s obzirom na oblik, način usmjeravanja produkata detonacije i funkciju na:

- konusne kumulativne eksplozivne naboje ili perforatore (Slika 2-1) i
- linijske (linearne) kumulativne naboje ili rezače (Slika 2-2) (Bohanek 2013).



Slika 2-1 Kumulativni perforator (Martin 2021)



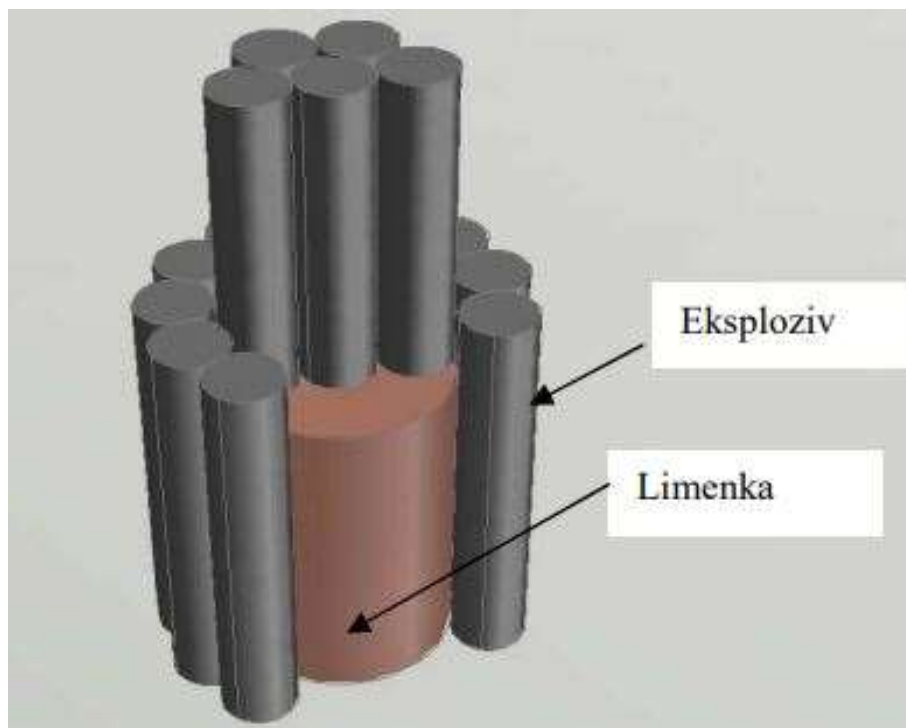
Slika 2-2 Kumulativni rezač (Martin 2021)

2.1. Munroeov efekt

Munroeov efekt dobio je ime po profesoru Charlesu E. Munroe-u, Američkom kemičaru, koji ga je otkrio. Radeći u američkoj mornaričkoj torpednoj bazi (engl. *U.S. Naval Torpedo Station*) u Newportu, Rhode Island, primijetio je da su, prilikom detonacije eksploziva koji je bio u kontaktu s čeličnom pločom, inicijali koji su bili utisnuti na eksplozivu, nakon detonacije eksploziva, ostali su utisnuti u čeličnu ploču.

Munroe nije bio prvi koji je otkrio efekt kumulativnih naboja, no prvi je uspješno demonstrirao utjecaj kumulativnog prostora kod probijanja masivne čelične mete. Izradio je prvi kumulativni naboj s metalnom oblogom kumulativnog prostora koji je primijenjen za probijanje sefa načinjenog od čeličnih ploča. Sastojao se od tanke limenke s patronama eksploziva oko nje koja je imala otvoren donji kraj. Konstrukcija Munroeovog kumulativnog naboja prikazana je na Slici 2-3.

Munroeva istraživanja objavljena su u časopisu *Popular Science Monthly* te je njihova objava pridonijela povezivanju Munroeva imena s kumulativnim efektom (Kennedy 1983).

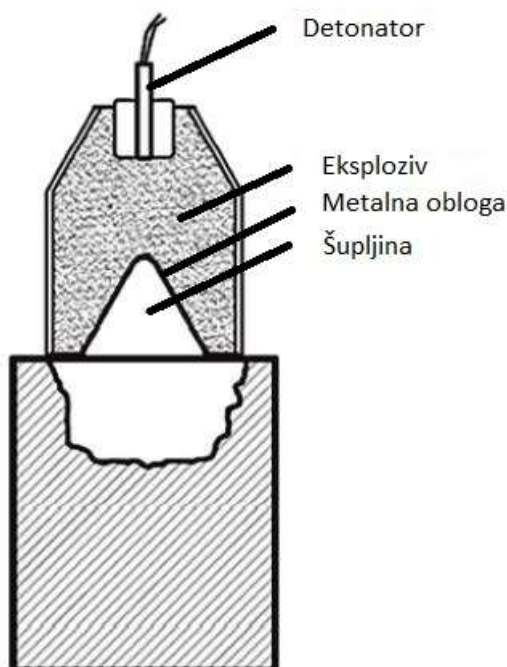


Slika 2-3 Konstrukcija kumulativnog naboja Charles E. Munroea (Bohanek 2013)

3. KONUSNI KUMULATIVNI NABOJI

Konusni kumulativni eksplozivni naboji ili perforatori služe za jednoosno probijanje materijala na koji djeluju. Detonacijom takvih naboja oslobađa se mlaz visokog tlaka i velike brzine. Izradom kumulativnog prostora energiju oslobođenu detonacijom moguće je usmjeriti pa se prema tom svojstvu kumulativni eksplozivni naboji razlikuju od ostalih naboja.

Kumulativni eksplozivni naboj je cilindar u kojem je smješten eksploziv. Na jednom kraju cilindra nalazi se konusna šupljina obložena metalom, dok se na drugom kraju nalazi središnji detonator, niz detonatora ili vodilica detonacijskog vala. Presjek konusnog kumulativnog naboja prikazan je na Slici 3-1.

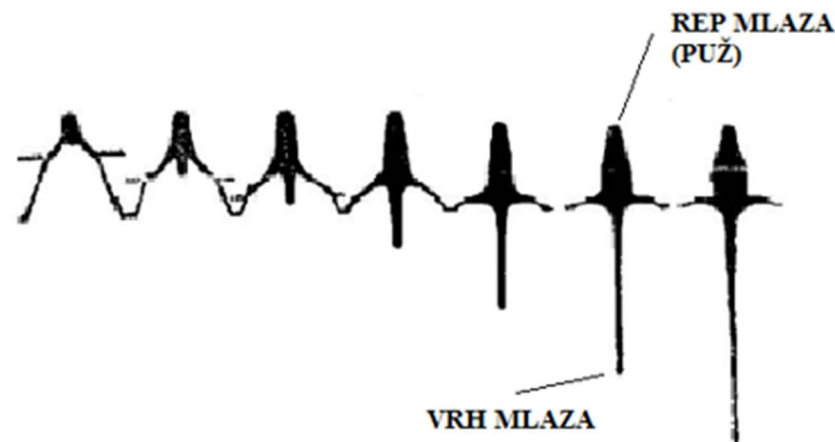


Slika 3-1 Presjek konusnog kumulativnog naboja (Bohanek, Dobrilović, Škrlec 2014)

Eksplozivna energija oslobađa se izravno s površine eksploziva. Ako je šupljina ispravno oblikovana (obično je stožastog oblika), visoki tlak koji nastaje detonacijom eksploziva tlači metalnu oblogu u šupljinu. Pritom nastaje mlaz metalnih čestica velike brzine.

Brzine takvog mlaza su nadzvučne. Vrh mlaza kreće se brzinom od 7 do 14 km/s, dok se repni dio mlaza, koji se još naziva i puž, kreće brzinom od 1 do 3 km/s (Slika 3-2) Brzina mlaza ovisi o obliku i količini eksplozivnog punjenja, vrsti eksploziva, o

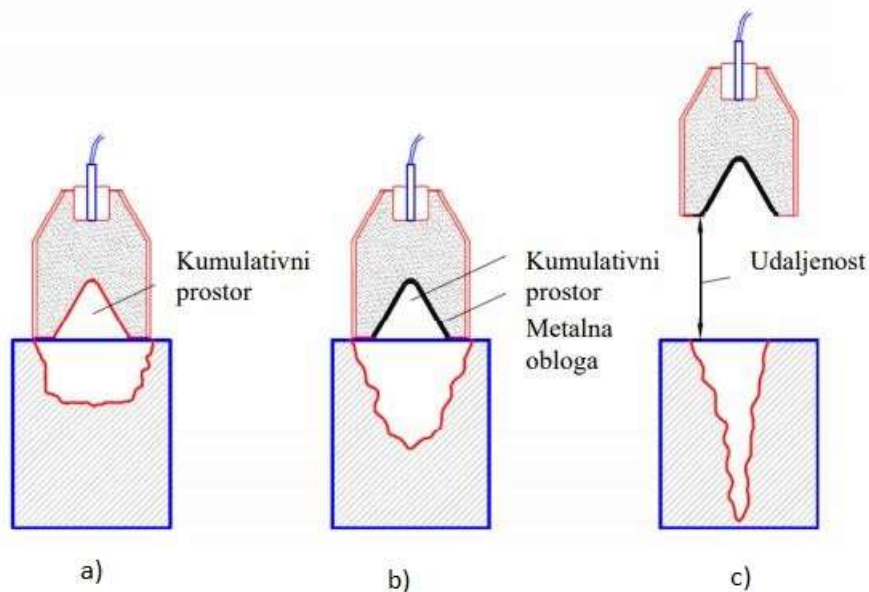
materijalima od kojih je izrađena konstrukcija te o načinu detoniranja. Proces perforacije mlaza u materijal može se promatrati kao hidrodinamički proces.



Slika 3-2 Rušenje obloge i nastanak mlaza (Elshenawy, 2012)

Nedavna tehnika koja koristi analizu magnetske difuzije pokazala je da je temperatura vrha bakrenog mlaza tijekom leta bila između 1100 K i 1200 K, mnogo bliže točki taljenja bakra (1358 K) nego što se ranije pretpostavljalo .

Za optimalnu perforaciju ciljanog materijala, ključan je položaj naboja u odnosu na ciljani materijal. Ako je naboj detoniran preblizu ciljanog materijala, nema dovoljno vremena da se mlaz u potpunosti razvije. Prevelika udaljenost naboja od ciljanog materijala prouzročit će raspadanje i raspršivanje mlaza, što će smanjiti perforaciju u dubinu, a povećati perforaciju u širinu. Također, kod prevelike udaljenosti smanjit će se i brzina mlaza zbog otpora zraka. Na Slici 3-3 a) prikazana je šupljina uzrokovana upotrebom kumulativnog naboja bez obloge. Uočavamo da je u tom slučaju nastala šupljina najmanja. Ako koristimo obloženi kumulativni prostor b) nastala šupljina značajno je veća nego u slučaju kada je korišten naboj bez obloge kumulativnog prostora. U slučaju c), možemo uočiti da je udaljavanjem kumulativnog naboja, šupljina koja je nastala veća od šupljina koje su nastale u prethodna dva slučaja. Šupljina nastala interakcijom između mlaza i mete posljedica je hidrodinamičkog protoka u metu iznimno visokim pritiskom, a ne kao posljedica toplinskog učinka.



Slika 3-3 . Princip djelovanja eksplozivnih kumulativnih naboja (Bohanek 2013)

Konačno, ključ učinkovitosti konusnog naboja je njegov promjer. Kako se perforacija nastavlja kroz metu, širina rupe se smanjuje.

3.1. Obloga

Razmjerno najvažniji element kumulativnih naboja je obloga kumulativnoga prostora. Parametri povezani s oblogom su materijal obloge i oblik obloge (Bohanek 2013). Oblik i materijal obloge utječu na uspješnost prodiranja u ciljani materijal. Obloga je najčešće izrađena u obliku stošca. Unutarnji kut stošca kreće se od 40 do 90 stupnjeva. Različiti kutovi vrha daju različite raspodjele mase i brzine mlaza. Ako je taj kut mali, mlaz će biti duži, tanji i prodorniji. Povećanjem kuta, mlaz postaje sve kraći, deblji i manje prodoran. Također, mali kutovi vrha mogu rezultirati bifurkacijom mlaza ili čak neuspjehom formiranja mlaza. Osim u obliku stošca, obloga može biti poluokrugla, eliptična, u obliku zvona, itd. . Različiti oblici obloge također daju mlazove različite raspodjele brzine i mase. Tako primjerice stožaste obloge imaju dublje prodiranje s malim promjerom rupe dok obloge u obliku zvona proizvode plitko prodiranje s većim promjerom rupe.

Materijal obloge kumulativnoga prostora izložen je ekstremno visokim naprezanjima, tlakovima i temperaturama u izrazito kratkom vremenskom razdoblju (Bohanek 2013) . Najdublje perforacije postižu se gustim, duktilnim metalom pa se zbog toga često koristi

bakar. Odabir materijala obloge ovisi o vrsti ciljanog materijala. Na primjer, metalna obloga izrađena od aluminija koristi se za perforiranje betona. U tablici Tablica 3-1 prikazani su metali poredani od najboljeg prema najlošijem. Rezultati su dobiveni analizom pojedinih metala na temelju gustoće, maksimalne teoretske brzine primarnog mlaza, brzine prolaza zvuka i umnoška brzine primarnog mlaza i gustoće materijala (Held 2001).

Tablica 3-1 Prikaz različitih metala za oblogu kumulativnih naboja prema mogućnosti njihove primjene (Held 2001)

	Al	Ni	Cu	Mo	Ta	U	W
Gustoća (g/cm ³)	2,7	8,8	8,9	10	16,6	18,5	19,4
Brzina zvuka (km/s)	5,4	4,4	4,3	4,9	2,4	2,5	4
$v_{p maks}$ (km/s)	12,3	10,1	9,8	11,3	5,4	5,7	9,2
$v_{p maks}\sqrt{\rho_p}$	20,2	30	29,2	35,7	22	22	40,5
Poredak	7	3	4	2	6	5	1

Za najdublje perforacije, čisti metali daju najbolje rezultate zbog svoje duktilnosti, što sprječava raspadanje mlaza na čestice. U naftnoj industriji obloge se proizvode praškastom metalurgijom, najčešće od pseudolegura koje, ako su nesinterirane, stvaraju mlazove koji su uglavnom sastavljeni od raspršenih finih metalnih čestica. Međutim, nesinterirane hladno prešane košuljice nisu vodootporne i obično su lomljive pa se umjesto njih mogu koristiti bimetalne košuljice, obično od bakra obloženog cinkom.

3.2. Eksplozivno punjenje

Od konusnog eksplozivnog naboja traži se što veći probojni učinak uz uporabu što manje količine eksploziva. Za optimalnu perforaciju, kao eksplozivno punjenje konusnih eksplozivnih naboja, koristi se eksploziv s velikom brzinom detonacije. Najčešće se koristi oktogen (HMX), koji se zbog velike brizantnosti spaja s određenim postotkom plastičnog veziva ili s manje osjetljivim eksplozivom, na primjer TNT-om, s kojim tvori oktol. Uobičajeno je da se koristi i heksogen (RDX), ali također u smjesi s plastičnim vezivom ili manje osjetljivim eksplozivom. Uz navedene eksplozive koriste se još i pentrit (PETN), C-4 te SEMTEX. U Tablici 3-2 navedeni su eksplozivi koji se koriste za kumulativne naboje

kao i njihova svojstva. U neke eksplozive dodaje se aluminij u prahu, čime se povećava temperatura eksplozije, ali se tim dodatkom smanjuju ostale karakteristike konusnih naboja.

Tablica 3-2. Eksplozivi koji se koriste za kumulativne naboje (Bohanek, 2008)

	70 % HMX 30 % TNT	50 % PETN 50 % TNT	C-4	SEMTEX
Gustoća, ρ (g/cm ³)	1,80	1,67	1,40	1,61
Brzina detonacije, D (m/s)	8300	7470	7400	6800
Tlak detonacije, p (kbar)	310	233	192	186

3.3. Kućište

Kućište kumulativnih naboja dodatno usmjerava produkte detonacije u pravcu obloge i osigurava nepromijenjen oblik kumulativnih naboja pri manipulaciji i upotrebi. Obično se odabiru materijali velike gustoće i niske cijene. U pravilu, što je kućište deblje i od metala veće gustoće, učinkovitost kumulativnih naboja bit će veća.

4. PRIMJENA KONUSNIH KUMULATIVNIH EKSPLOZIVNIH NABOJA

Konusni kumulativni eksplozivni naboji koriste se u različitim granama industrije te se primjenjuju za jednoosno probijanje materijala na koji djeluju. Njihova primjena prisutna je u područjima:

- rudarstva, naftnog rudarstva i građevinarstva
- vojne namjene
- svemirske industrije

Naftno rudarstvo je jedna od prvih industrija u kojoj se djelovanje kumulativnog efekta uspješno primjenjuje. Velike naftne kompanije su razvile vlastite proizvodne pogone i istraživačke centre za proizvodnju i istraživanje kumulativnih eksplozivnih naboja. Naftna industrija je najveći potrošač konusnih kumulativnih perforatora.

Nakon završetka naftne bušotine, u istu se postavlja čelična cijev koja se cementira. Uređaj za perforiranje postavlja se na proizvodnu dubinu u bušotinu te se njime izrađuju šupljine kroz čeličnu cijev, cement i stijenu. Nastale šupljine služe kao poveznica kroz koje fluid iz ležišta teče prema bušotini i dalje prema površini. Proces je iznimno brz te o njemu ovisi dugoročna održivost i profitabilnost većine ležišta nafte i plina.

Za rezanje bušotinskih cijevi upotreba linijskih kumulativnih rezača je najjednostavnije, najefikasnije, a vrlo često i jedino moguće tehničko rješenje. (Bohanek 2013)

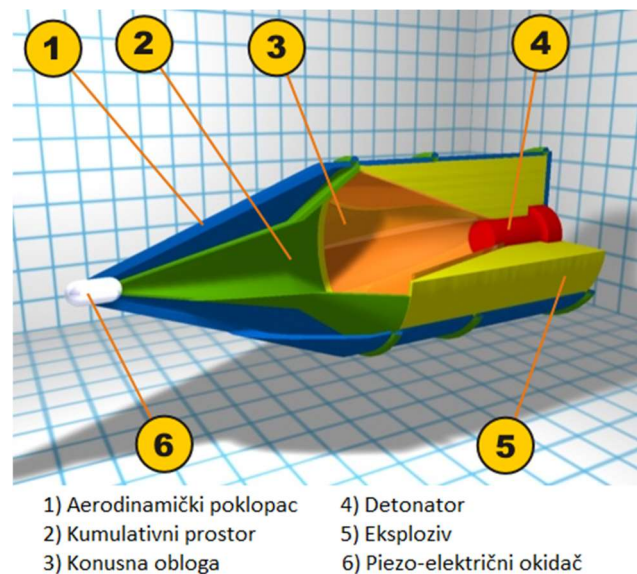
U području rudarstva i građevine kumulativni eksplozivni naboji imaju važnu ulogu kod rušenja raznih objekata i konstrukcija. Primjenjuju se u slučajevima kada korištenje konvencionalnih tehnika bušenja nije moguće, a to su:

- bušaća mjesta koja predstavljaju opasnost za izvođača bušenja i bušilicu
- bušaća mjesta na nepristupačnom području
- bušaća mjesta gdje je bušenje potrebno obaviti u jako kratkom vremenu (Carl F. Austin 1959).

Upotrebljavaju se za rušenja građevinskih strojeva u slučaju ako demontaža klasičnim postupcima nije isplativa, usitnjavanje metalnih profila, rušenje objekata metalne ili betonske konstrukcije kao što su mostovi, zgrade, dizalice i slično.

U području vojne industrije, kumulativni naboji koriste se u kumulativnom oružju, pri rušenju objekata uklanjanjem čeličnih i armirano betonski konstrukcija, razminiranju, probijanju otvora u zidovima itd.

U smislu kumulativnog oružja izrađuju se kumulativni projektil, streljivo koje kumulativnim učinkom djeluje na oklopni cilj te ga tako uništava. Najbolji primjer takvog projektila je HEAT (*High explosive anti-tank warhead*). Slika 4-1 prikazuje konstrukciju kumulativnog projektila.



Slika 4-1 Kumulativni projektil

Prilikom razminiranja kumulativnim se rezačima neutraliziraju neaktivirane bojeve glave i mine.

U svemirskoj industriji koriste se kumulativni rezači za razdvajanje pojedinih dijelova letjelice prilikom lansiranja. Odvajaju se pojedini stupnjevi raketnog motora, kod raketa koje imaju višestupanjske motore, iskorišteni raketni spremnici goriva i potisnici (engl. *solid rocket booster*, skraćeno SRBI). Linijski kumulativni rezači se također koriste za izrezivanje i odbacivanje dijelova oplata.

Svemirska industrija uložila je značajna sredstva u razvoj linijskih kumulativni rezača te je zaslužna za razvijanje linijskih kumulativnih rezača.

5. UTJECAJ EKSPLOZIVNOG PUNJENJA NA UČINKOVITOST KONUSNIH KUMULATIVNIH EKSPLOZIVNIH NABOJA

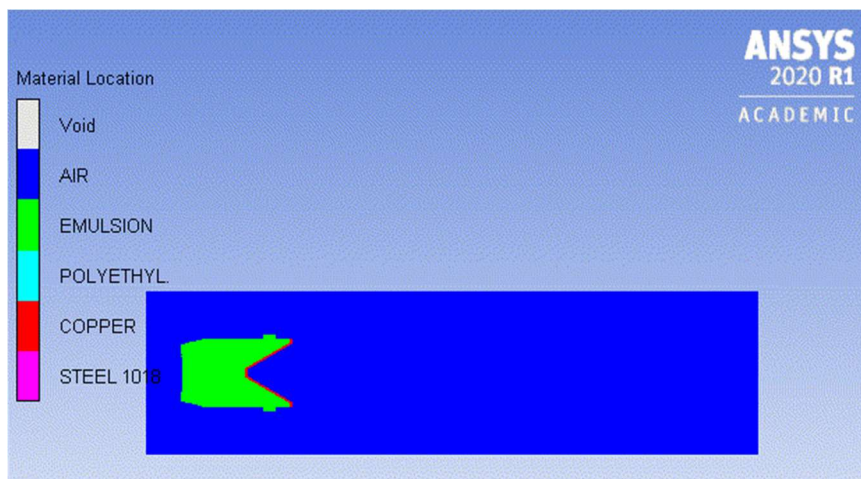
Procjenu utjecaja pojedinih čimbenika na učinkovitost kumulativnih nabojâ moguće je odrediti na dva načina. Prvi način se odnosi na terenska mjerenja duljine perforacije na ciljanom materijalu - meti, dok drugi način uključuje upotrebu specijaliziranih računalnih programa. Za simulaciju procesa penetracije razvijeni su različiti numerički kodovi. Trenutno su najviše u upotrebi komercijalni hidrokodovi poput AUTODYN-a i LS-DYNA-e. Softver AUTODYN naširoko se koristi u simulaciju utjecaja detonacije eksploziva i drugih procesa koji uključuju eksploziv. Program sadrži vlastitu biblioteku materijala, ali se mogu dodati podaci o novim materijalima koji zahtijevaju gustoću, jednadžbe stanja, modele čvrstoće i druga svojstva materijala. Koristi se za simulaciju oblikovanja i procesa prodora. AUTODYN je korišten za simulaciju brzine mlaza kumulativnih perforatora sa dva različita eksplozivna punjenja te dubinu penetracije u ciljanom materijalu.

5.1. Izrada modela u AUTODYN-u

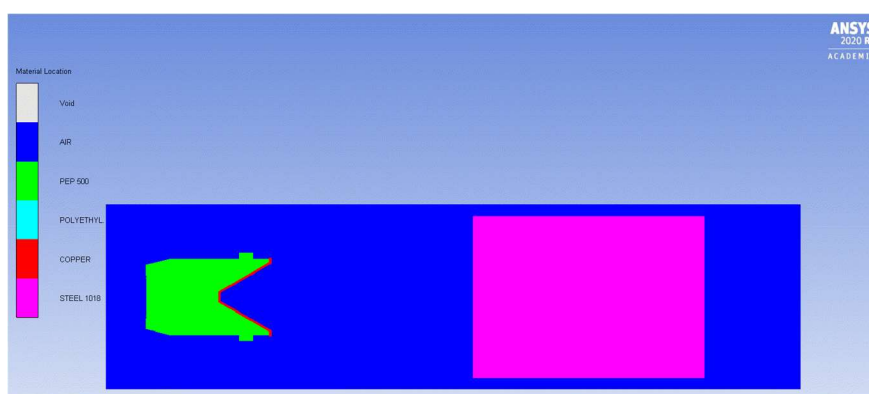
Ansys Autodyn simulira odziv materijala na kratkotrajna teška opterećenja od udara, visokog tlaka ili eksplozije. Najprikladniji je za simulaciju velikih deformacija materijala ili loma. Autodyn nudi napredne metode rješenja bez ugrožavanja jednostavnosti korištenja. Složeni fizički fenomeni poput međudjelovanja tekućina, krutih tvari i plinova; fazni prijelazi materijala i širenje udarnih valova može se modelirati unutar Autodyna (ANSYS AUTODYN User's Manual, 2010)

Izrada simulacije započinje izradom modela kumulativnog perforatora. Izrađena su dva različita modela. Obzirom da je cilj bio odrediti utjecaj eksploziva na brzinu mlaza kumulativnih perforatora i duljinu penetracije u ciljanom materijalu geometrijske karakteristike i uporabljeni materijali su identični jedina je razlika uz eksplozivnom punjenje kumulativnih perforatora. Prilikom simulacije penetraciju mlaza u ciljani materijal bilo je potrebno dati i materijal mete.

Prikaz dva različita modela dan je slikama Slika 5-1 i Slika 5-2

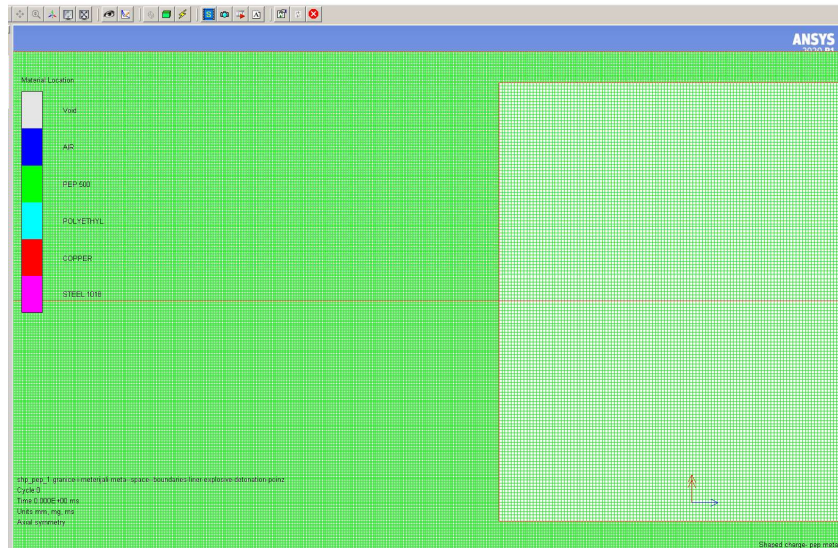


Slika 5-1 Model za simulaciju brzine mlaza



Slika 5-2 Model za simulaciju penetracije mlaza

Izrada modela započinje crtanjem modela sa stvarnim dimenzijama u AUTODYN. Nakon izrade geometrije pojedinih dijelova svakom pojedinom dijelu je potrebno pridružiti mrežu određenih dimenzija. Mreža dijeli pojedini dio na određeni broj kvadratića. Što je mreža gušća, odnosno što su kvadratići manji, simulacija će biti točnija. Međutim potrebno je računalo s više radne memorije te je proces traži znatno više vremena. U ovom slučaju je izabran postav s mrežom od 0,25x0,25mm za sve elemente osim za materijal za koji je izabrana mreža 0,5 x 0,5 mm. Mreža je izabrana na osnovu literaturnih podataka te metodom pokušaja i pogrešaka. Prikaz odabranih mreža dan je Slikom 5-3.



Slika 5-3 Odabrane mreže

Nakon definiranja mreže svaki od pojedinih geometrijskih oblika se ispunjava s materijalom pojedinih karakteristika. Većina materijala već postoji u programu, međutim u slučaju potrebe moguće je unijeti nove materijale ili modificirati postojeće. Za potrebe simulacije korišten je zrak koji predstavlja medij u kojem se proces odvija, bakar za oblogu kumulativnog rezača, čelik za metu te dva različita eksploziva; emulzijski i plastični eksploziv. U prvim simulacijama se za materijal kućišta koristio polietilen, no s obzirom na neznatan učinak na rezultate simulacije nije se koristio pri idućim simulacijama. Za svaki od materijala potrebo je izabrati jednadžbu stanja (*Equation of State*) prema kojem se materijal ponaša. Za zrak je izabrana jednadžba stanja idealnoga plina, dok je za eksplozive izabrana JWL jednadžba stanja. Za bakar i čelik je izabrana Hugoniotova jednadžba stanja. Parametri za sve materijale u navedeni u tablicama Tablica 5-1 i Tablica 5-2.

Tablica 5-1 Svojstva Cu obloge

Svojstva	Obloga (Cu)
Jednadžba stanja	Šok
Gustoća (g/cm ³)	8,93
Grüneisenov koeficijent	1,99
Parametar C1 (m/s)	3940
Parametar S1	1,4890

Tablica 5-2 Svojstva korištenih eksploziva

	PEP 500	EMUL
Jednadžba stanja	JWL	JWL
Referentna gustoća (g/cm ³)	1,575	1,250
Parametar A (kPa)	3,6891E+08	1,3306E+08
Parametar B (kPa)	9,2481E+06	2,3508E+06
Parametar R1	4,21331	3,9255E+00
Parametar R2	1,105134	9,3640E-01
Parametar ω	0,371409	3,9678E-01
C-J Brzina detonacije (m/s)	7 400	4900
C-J Energija/ jedinica volumena (kJ/m ³)	8,0900E+06	3,6220E+06
C-J Tlak (kPa)	2,2370E+07	6,5440E+06

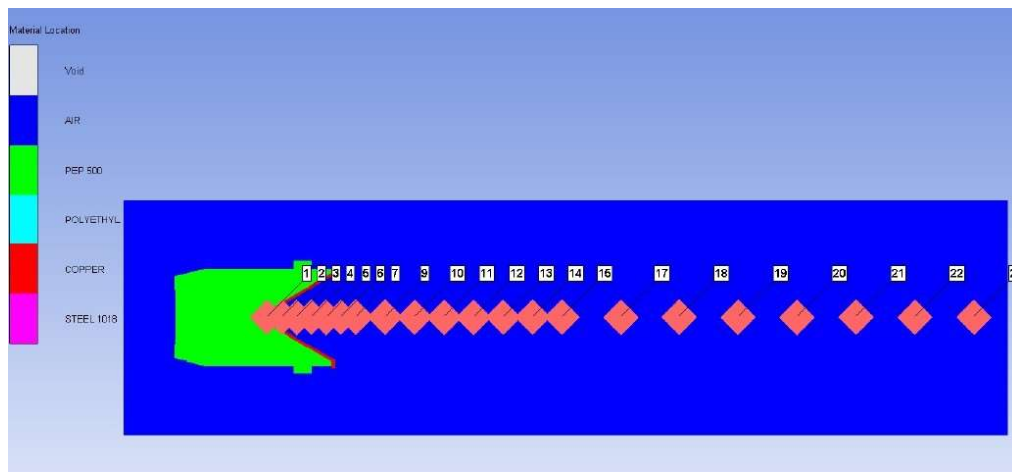
Tablica 5-3 Svojstva čelika 1018

Svojstva	1018 Čelik
Gustoća (g/cm ³)	7,87
Tvrdoća po Brinellu	126
Vlačna čvrstoća - granica krutosti (MPa)	440
Vlačna čvrstoća - granica plastičnosti (MPa)	370
Modul elastičnosti (GPa)	205
Rasuti modul (GPa)	140
Poissonov koeficijent	0.290
Modul smicanja (GPa)	80.0

Parametri za Bakar i čelik 1018 su povučeni iz biblioteke programa dok su podaci za eksploziv preuzeti iz tehničke specifikacije. Parametri bitni za JWL jednadžbu stanja (A, B, R1, R2 i ω) izračunati su pomoću EXPLO 5 programa.

5.2. Simulacija brzine mlaza

Kod simulacije brzine mlaza postavljeni su senzori za mjerenje brzine mlaza na različitim odaljenostima od vrha obloge. Ukupno je postavljeno 23 senzora. Prikaz postava sa sensorima dan je Slikom 5-4

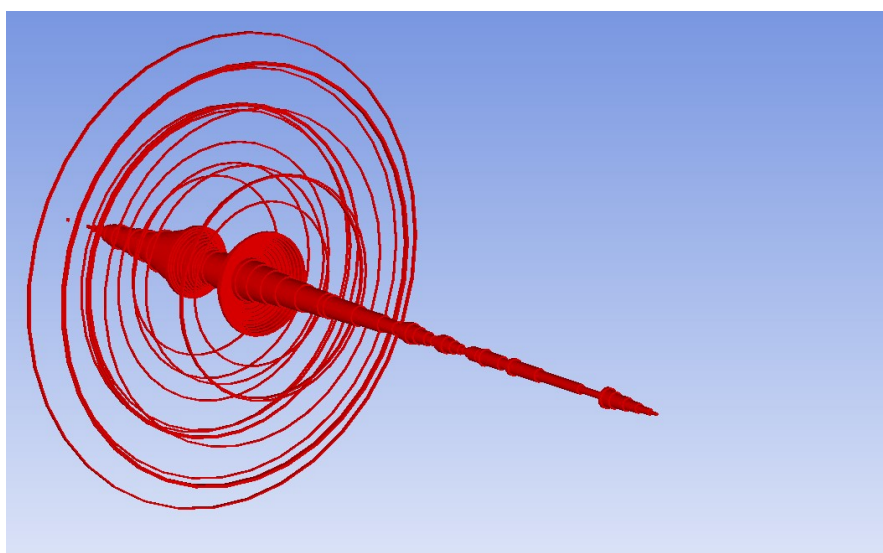


Slika 5-4 Postav sa senzorima

Prije pokretanja simulacije potrebno je izabrati model (*solver*) prema kojem se odvija interakcija među materijalima. Prema podacima iz literature za formiranje mlaza najprikladniji je *Lagrange solver* dok se prilikom interakcije mlaza i mete koristi *Euler-Lagrange solver*.

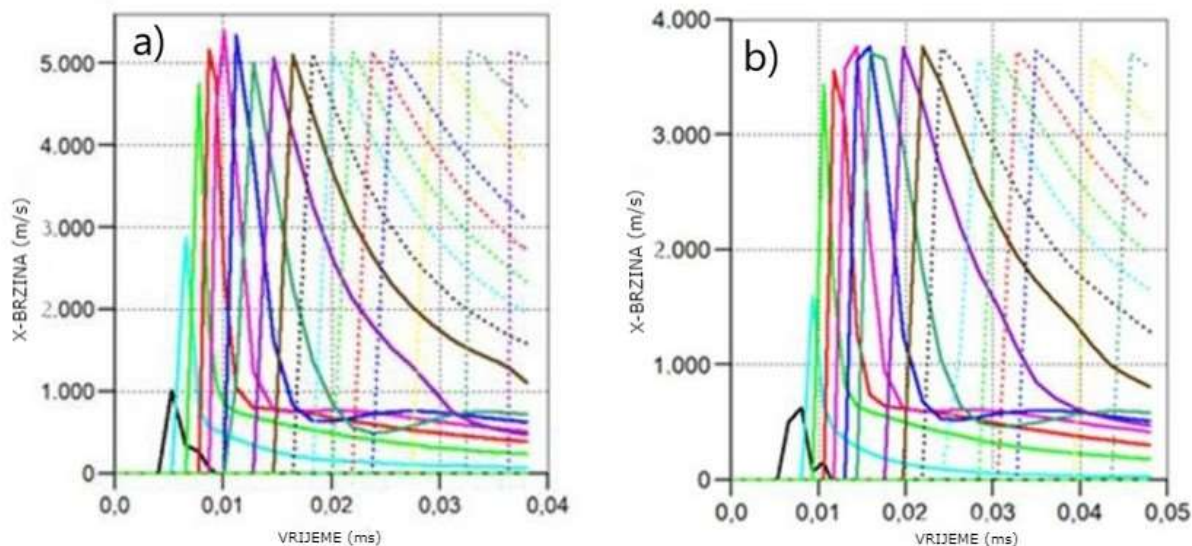
Nakon pokretanja simulacije model daje cjelokupno simulaciju procesa od iniciranja eksploziva, stvaranja mlaza, izduživanja pa sve do raspadanja mlaza.

3D prikaz mlaza dan je Slikom 5-5.



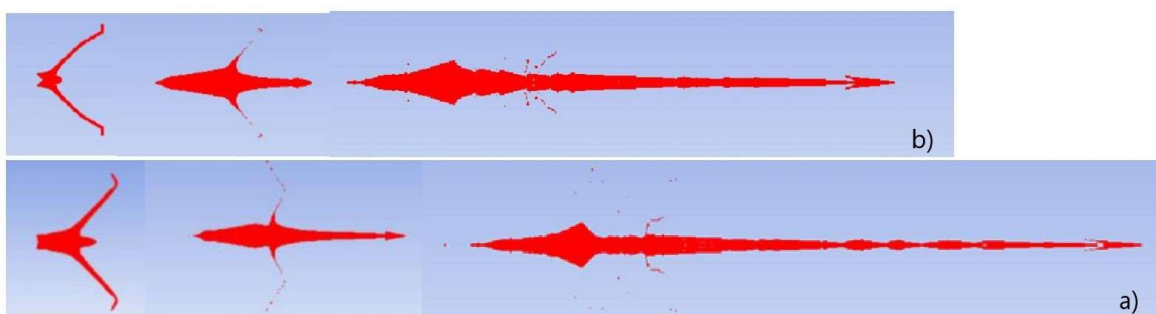
Slika 5-5 3D prikaz mlaza

Brzine mlaza ova zabilježene pomoću senzora prikazane su Slikom 5-6.



Slika 5-6 Brzine mlazova

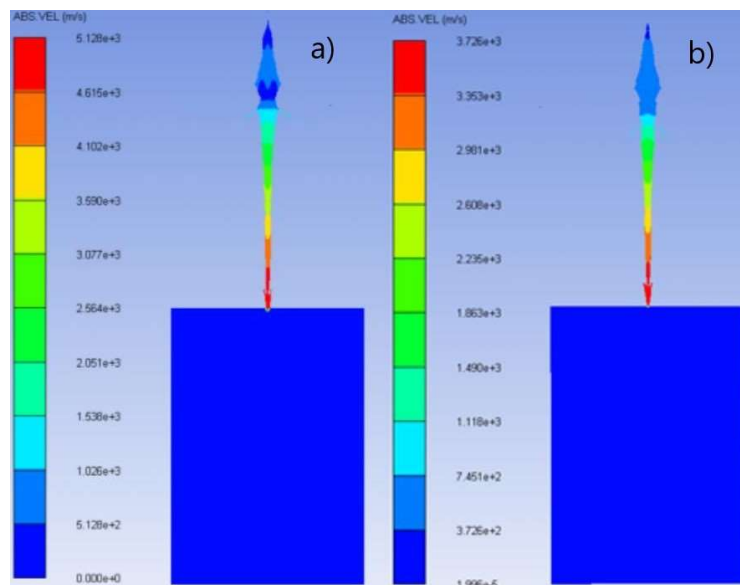
Usporedna slika 2 mlaza u vremenu od 10 μ s, 20 μ s i 40 μ s prikazini su Slikom 5-7



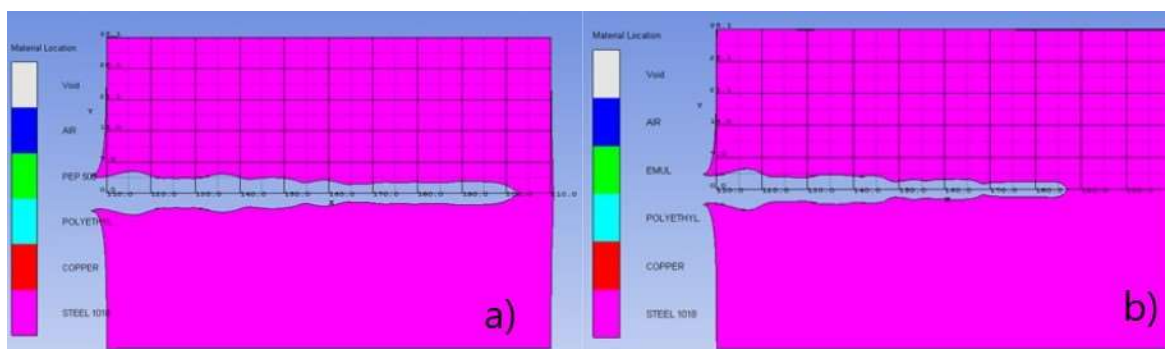
Slika 5-7 Mlazovi kumulativnih perforatora, a) PEP 500, b) Emulzijski eksploziv

5.3. Simulacija brzine mlaza

27,4 ms nakon iniciranja mlaz generiran eksplozivom PEP 500 doseže cilj čelik 1018 brzinom od 5128 m/s i započinje proces prodiranja. Mlaz proizveden od emulzijskog eksploziva sporiji je i dostigao je cilj 37,4 μ s nakon detonacije brzinom od 3726 m/s. Nakon završetka procesa penetracije duljina rupe za probijanje u meti bila je 93 mm za PEP500 i 77 mm za emulzijski eksploziv. Na Slici 5-8 dan je prikaz oba mlaza u trenerku kontakta s metom, a perforacije oba mlaza u meti nakon završetaka prikazane su Slikom 5-9.



Slika 5-8 Mlazovi kumulativnih perforatora i mete, a) PEP 500, b) Emulzijski eksploziv



Slika 5-9 Oblik i duljina perforacije, a) PEP 500, b) Emulzijski eksploziv

6. ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA

Pri simulaciji utjecaja eksploziva na učinkovitost kumulativnih perforatora korištena su dva eksploziva koja imaju različite brzine detonacije. Prvi eksploziv PEP 500 ima brzinu detonacije od 740 m/s dok drugi, emulzijski eksploziv, ima brzinu 4900 m/s. Brzine detonacije eksploziva je najbitnije svojstvo eksploziva koje utječe na brzinu mlaza i učinkovitost kumulativnih perforatora. Simulacija izvedene u AUTODYNU potvrdila je podatke prisutne u literaturi. Pri simulaciji učinka mlaza kumulativnog perforatora s PEP 500 eksplozivom zabilježena je veća brzina mlaza, veća postignuta duljina mlaza i uzročno posljedično veće perforacija u materijalu meti. Brzina mlaza kumulativnog rezača prilikom nailaska na metu iznosi 5128 m/s dok brzina mlaza kumulativnog rezača s emulzijskim eksplozivom iznosi 3726 m/s. U čeliku 1018 mlaz linijskog kumulativnog perforatora s PEP 500 eksplozivom postigao je dubinu penetracije od 9,3 mm dok je kod mlaza kumulativnog rezača s emulzijskim eksplozivom zabilježena dubina perforacije od 7,7mm.

7. ZAKLJUČAK

Izbor eksploziva za eksplozivno punjenje kumulativnog perforatora jedan je od bitnih čimbenika koji utječu učinkovitost kumulativnih perforatora. Najbitniji detonacijski parametar pri izboru eksploziva je brzina detonacije eksploziva. U pravilu osim visoke brzine detonacija korišteni eksplozivi imaju i veliku gustoću. Utjecaj brzine detonacije na učinkovitost kumulativnih perforatora ispitana je simulacijom pomoću AUTODYN računalnog programa. Upotreba numeričkih programa može biti vrlo korisna za optimiziranje parametara kumulativnog naboja pri konstrukciji novog proizvoda ili za korisnike u različitim vrstama istraživanja vezanim uz kumulativne naboje. Također, rezultati simulacije vrlo su korisni za vizualizaciju i razumijevanje procesa formiranja mlaza i penetracije kumulativnog naboja.

Mjerenje brzine mlaza kumulativnog naboja nije jednostavan zadatak i zahtijeva skupu opremu. S druge strane rezultati brzine mlaza dobiveni pomoću Autodyna vrlo su točni. Međutim, rezultate simulacije je uvijek potrebno potvrditi mjerenjima na terenu. Najbolji pristup, ako je to moguće, bilo bi zajedničko korištenje Autodyna i ispitivanja na terenu.

8. LITERATURA

ANSYS, Inc. 2010 ANSYS AUTODYN User's Manual, Canonsburg, Pennsylvania

Austin C. F. 1959. Lined- cavity shaped charges and their use in rock and earsth materials, State Bureau of Mines and Minerals Resources, New Mexico Institute of Mining & Technology

Barić, A. 2020. Presijecanje čeličnog užeta eksplozivom, Završni rad, Zagreb, Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Bohanek, V. 2008. Kumulativni naboji i njihova upotreba, Seminarski rad, Zagreb, Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Bohanek, V. 2013. Model nastajanja i analiza djelovanja kumulativnoga procesa linearnih eksplozivnih naboja, Doktorski rad, Zagreb, Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Bohanek, V., Dobrilović, M., Škrlec V. 2014. Učinkovitost linijskih kumulativnih rezača, Tehnički Vjesnik, 6(1), 1

Elshenawy, T. A. E., 2012. Criteria of Design Improvement of Shaped Charges Used As Oil Well Perforators, Southhampton, The Faculty of Engineering and Physical Sciences

Held, M. (2001): Liners for Shaped Charges. Journal of Battlefield Technology, 4(3), 1-7

Kennedy D. R. (1983): History of shaped charge effect, the first 100 years. Part I-IV, LOS ALAMOS NATIONAL LABORATORY.

Martin, A. 2021. Podvodni kumulativni naboji, Diplomski rad, Zagreb, HRVATSKO VOJNO UČILIŠTE "Dr. Franjo Tuđman"

Sučeska, M. 2001. Eksplozije i eksplozivi njihova mirnodobska primjena, Zagreb: Brodarski institut



KLASA: 602-04/21-01/131
URBROJ: 251-70-11-21-2
U Zagrebu, 13.09.2021.

David Žugec, student

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-04/21-01/131, URBROJ: 251-70-11-21-1 od 28.04.2021. priopćujemo vam temu završnog rada koja glasi:

UTJECAJ EKSPLOZIVNOG PUNJENJA NA UČINKOVITOST KONUSNIH EKSPLOZIVNIH NABOJA

Za voditelja ovog završnog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i ocjeni završnog rada Izv.prof.dr.sc. Vječislav Bohanek nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu

Voditelj


(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Vječislav Bohanek

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za
završne i diplomske ispite:

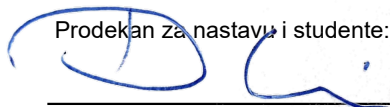


(potpis)

Doc.dr.sc. Dubravko
Domitrović

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:



(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Dalibor
Kuhinek

(titula, ime i prezime)