

Primjena kumulativnih eksplozivnih naboja

Jurić, Toni

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:169:633811>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-13**



Repository / Repozitorij:

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



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

PRIMJENA KUMULATIVNIH EKSPLOZIVNIH NABOJA

Završni rad

Toni Jurić

R4466

Zagreb, 2021

PRIMJENA KUMULATIVNIH EKSPLOZIVNIH NABOJA

Toni Jurić

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

Sažetak

Kumulativni eksplozivni naboji primjenjuju se rezanje i probijanje raznih vrsta materijala. Primjenjuju se u industriji nafte, vojnoj i svemirskoj industriji te građevinarstvu i rudarstvu. Učinak kumulativnih nabojâ ostvaruje se stvaranjem kumulativnog mlaza koji nastaje razaranjem obloge kumulativnog prostora. Najzastupljeniji materijal obloge je bakar. Dijelimo ih na linijske kumulativne naboje i konusne kumulativne naboje.

Ključne riječi: Rudarstvo, kumulativni naboj, eksploziv, učinak, primjena

Završni rad sadrži: 31 stranicu, 1 tablicu, 24 slike, 0 priloga, i 18 referenci.

Jezik izvornika: Hrvatski

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

Mentori: Dr. sc. Vječislav Bohanek, docent RGNF

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

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. POVIJEST KUMULATIVNIH EKSPLOZIVNIH NABOJA	2
3. NAČIN DJELOVANJA KUMULATIVNIH NABOJA I NJIHOVA PODJELA	5
3.1. Način djelovanja	5
3.2. Podjela kumulativnih eksplozivnih naboja	9
3.2.1. Linijski kumulativni naboji ili rezači	9
3.2.2. Konusni kumulativni eksplozivni naboji ili perforatori	11
4. PRIMJENA KUMULATIVNIH EKSPLOZIVNIH NABOJA U INDUSTRIJI	13
4.1. Primjena kumulativnih naboja u rudarstvu i građevinarstvu	13
4.2. Primjena kumulativnih naboja u naftnoj industriji	17
4.3. Primjena kumulativnih naboja u vojnoj i svemirskoj industriji	20
5. ZAKLJUČAK	23
6. LITERATURA	24

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Vizualni prikaz kućišta (Kennedy 1983)	2
Slika 2-2. Konstrukcija kumulativnog naboja Charles E. Munroea (Bohanek 2013).....	3
Slika 3-1. Shematski prikaz poprečnog presjeka kumulativnog eksplozivnog naboja (Elshenawy, 2012).....	5
Slika 3-2. Rušenje obloge i nastanak mlaza (Bohanek, osobna arhiva).....	6
Slika 3-3. Različiti učinci kumulativnog naboja i njihov princip djelovanja (Elshenawy, 2012).....	6
Slika 3-4. Utjecaj kuta stožaste obloge na karakteristike mlaza (Elshenawy,2012)	7
Slika 3-5. Linijski kumulativni naboj: a) kumulativni rezač i b) njegov učinak na čeliku (Duan et al., 2017).....	9
Slika 3-6. Savitljivi linijski kumulativni rezač i cijev prerezana njegovom detonacijom (Bohanek, 2013)	10
Slika 3-7. Kruti linijski kumulativni rezač (PACSCI EMC, 2021).....	10
Slika 3-8. Konusni kumulativni eksplozivni naboj (Zhang, 2016)	11
Slika 3-9. Učinak konusnog kumulativnog eksplozivnog naboja na meti nakon detonacije (Applied Explosives, 2008).	12
Slika 4-1. Plan rušenja čeličnog lučnog mosta Qinghemen (Duan et al., 2017)	14
Slika 4-2. Kostur čelične konstrukcije i raspored kumulativnih rezača (Duan et al., 2017)14	
Slika 4-3. Postupak rušenja mosta (Duan et al., 2017).....	15
Slika 4-4. Urušena komponenta čelične konstrukcije (Duan et al., 2017)	15
Slika 4-5. Proces perforacije i detonacija kumulativnog naboja (Smithson, 2012)	17
Slika 4-6. Uređaj za perforiranje (Smithson, 2012).....	18
Slika 4-7. Linijski kumulativni rezač za rezanje bušutinskih cijevi (Bohanek, 2013).....	19
Slika 4-8. Kružni rezač (Bohanek, 2013)	19
Slika 4-9. Kumulativni projektil (Guns vs Armour).....	20
Slika 4-10. Podvodna neutralizacija mina i bojnih glava (Christ i WernliSr, 2014).....	21
Slika 4-11. Neutralizacija mina i bojnih glava na kopnu (Bohanek, 2013).....	21
Slika 4-12. Kumulativni rezač za probijanje otvora u zidu (Bohanek, 2013)	21
Slika 4-13. Upotreba linijskog kumulativnog rezača pri razdvajanju donjeg dijela rakete (NASA, 2021).....	22

POPIS TABLICA

Tablica 3-1. Prikaz različitih metala za oblogu kumulativnih naboja prema mogućnosti njihove primjene (Held,2001).....	8
--	---

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
<i>USN</i>	-	američka mornarice,
<i>LSC</i>	-	linijski kumulativni naboj (rezač),
<i>RDX</i>	-	heksogen,
<i>TNT</i>	-	trinitrotoulen,
<i>HEAT</i>	-	visoko eksplozivna protutenkovska granata,
<i>NASA</i>	-	National Aeronautics and Space Administration,

1. UVOD

Eksplozivni naboj je količina eksplozivne tvari koja svojom detonacijom obavlja neki rad. Prema njihovu obliku dijelimo ih u tri skupine:

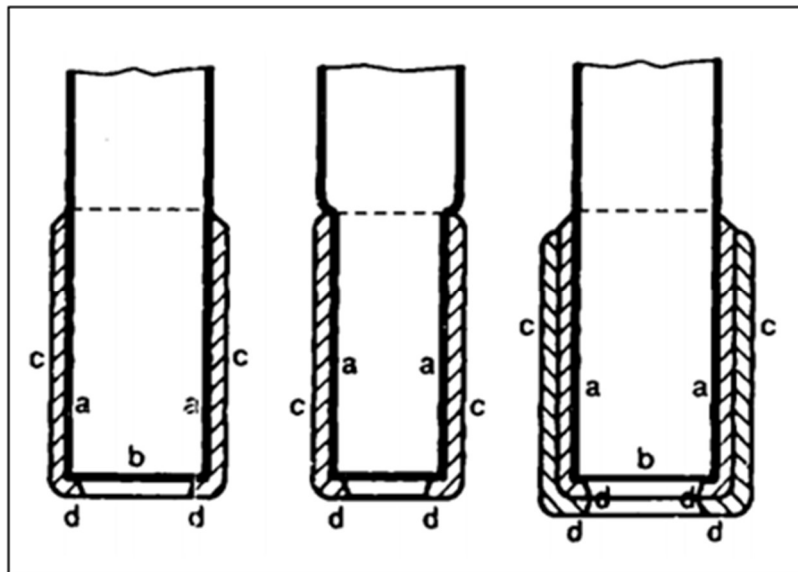
- koncentrirani eksplozivni naboji
- linijski eksplozivni naboji
- kumulativni eksplozivni naboji (Sućeska 2001).

Ukoliko je omjer između najduže i najkraće dimenzije manji od 3:1 eksplozivni naboj nazivamo koncentriranim a ako je taj omjer između najduže i najkraće dimenzije veći od 3:1 te omjer između kraćih dimenzija manji od 3:1 naboj se naziva linijskim. Kumulativni eksplozivni naboji (oblikovani naboji) namijenjeni su za rezanje te probijanje raznih vrsta materijala, perforiranje bušotina u industriji nafte i plina, iniciranje nuklearnog oružja. Njihova primjena detaljnije je opisana u poglavlju 4. U odnosu na ostale naboje razlikuju se po mogućnosti usmjeravanja energije oslobođene detonacijom (oblik punjenja eksplozivni mlaz usmjerava u određenom smjeru). Za eksplozivno punjenje kumulativnih naboja koriste se eksplozivi sa velikom brzinom i tlakom detonacije.

Obzirom na veliku učinkovitost u odnosu na druge oblike eksplozivnih naboja, kumulativni naboji imaju raširenu primjenu u različitim granama industrije. U radu je dan povijesni prikaz kumulativnih naboja, način djelovanja s posebnim osvrtom na primjenu kumulativnih eksplozivnih naboja.

2. POVIJEST KUMULATIVNIH EKSPLOZIVNIH NABOJA

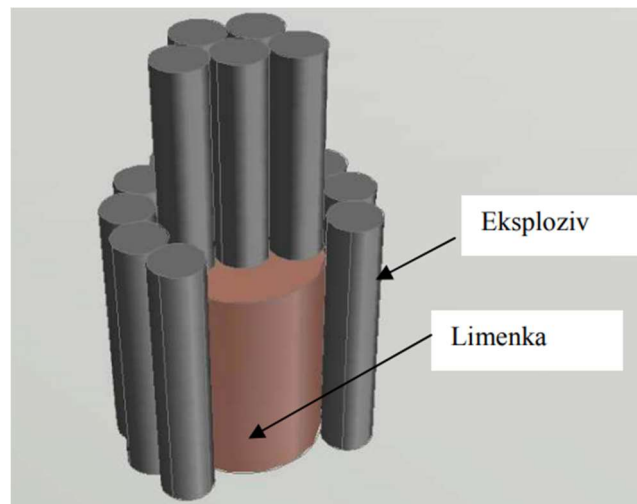
Najraniji spomen kumulativnog naboja pripisan je njemačkom rudarskom inženjeru Franz von Bader-u (1765-1841) 1792. godine. U jednom rudarskom dnevniku zagovarao je uporabu kumulativnog prostora kako bi se povećao učinak eksploziva a shodno tome uštedilo na potrošnji eksplozivnog praha. Njegova ideja se jedno vrijeme počela primjenjivati u Norveškoj te u rudnicima koji su se nalazili na visoravni Harz u sjevernoj Njemačkoj. Kako je u to vrijeme jedini raspoloživi eksploziv bio barut, a baruti tog vremena nisu bili visoko eksplozivni odnosno nisu mogli detonirati, povijest kumulativnog naboja započet će izumom detonatora Alfreda Nobela 1867. godine. Prvi pravi učinak kumulativnog efekta postigao je 1883. godine Max von Foerster (1845-1905) vlasnik tvornice nitroceluloze u Walsrodeu, Njemačka pri graviranju pomoću eksploziva. Metalno kućište detonatora s kumulativnim prostorom (Slika 2-1) je 1886. godine izumio Gustav Bloem sa ciljem da se učinak eksplozije koncentrira u aksijalnom smjeru. Ovo se smatra prvim kumulativnim nabojem koji je koristio obloženi kumulativni prostor (Walters 2008).



Slika 2-1. Vizualni prikaz kućišta (Kennedy 1983)

Charles Edward Munroe ime je koje se najčešće povezuje sa pronalaskom efekta kumulativnog prostora. Charles E. Munroe bio je profesor koji je kao kemičar radio u mornarici SAD-a. Koncept efekta kumulativnog prostora popularizirao je s nekoliko publikacija. U jednom od svojih poznatih eksperimenata, aktivirao je eksploziv koji se nalazio u kontaktu sa čeličnom pločom. Aktivirani eksploziv imao je na sebi inicijale USN koji su predstavljali američku mornaricu. Nakon detonacije inicijali su ostali reproducirani

na čeličnoj ploči. Primijetio je da se udubina nastala u čeličnoj ploči povećala kada se u cilindru eksploziva stvorila šupljina. Drugim riječima manja količina eksploziva u čeličnoj ploči bi mogla stvoriti veću udubinu. Sa njegovim imenom također se povezuje izrada prvog kumulativnog naboja sa metalno obloženim kumulativnim prostorom 1900. godine. Kumulativni naboj primijenio je za probijanje sefa čiji su zidovi bili debljine 4 inča a izrađeni su od čelika i željeza. Sami naboj konstruiran je vezanjem patrona eksploziva oko tanke limenke koja je imala otvor na donjem kraju (Slika 2-2). Važnost ovog otkrića ostala je neprepoznata čak 44 godine sve do 1945. kada je dio članka iz 1900. završio u jednom broju časopisa Popular Science koji opisuje kako su funkcionirale bojeve glave sa kumulativnim nabojem. Ovaj članak široj javnosti je otkrio kako je Bazooka djelovala protiv oklopnih vozila tijekom Drugog svjetskog rata (Kennedy 1983).



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

Prvi Sovjet koji je istraživao učinak kumulativnog efekta bio je Sukharevski 1925. i 1926. godine. Istraživanja u Italiji započinja 1932. godine kada je svoj rad o kumulativnom efektu objavio Lodatti. Prvo Francusko istraživanje o konceptu kumulativnog naboja izveo je Lepidi sa ljuskom koja je u biti bila kumulativni naboj s cilindričnom košuljicom, ali konačna konstrukcija ljuske nije uspjela zbog problema sa sustavom pokretanja. Ova rana istraživanja iako su bila zanimljiva široj publikaciji imala su malu primjenu sve do razdoblja uoči Drugog svjetskog rata. Franz Rudolf Thomanek iz Njemačke i Henry Hans Mohaupt bili su pronalazači modernog kumulativnog efekta te su izradili prvi perforator koji se bazirao na šupljem eksplozivnom punjenju (Walters 2008; Kennedy 1983).

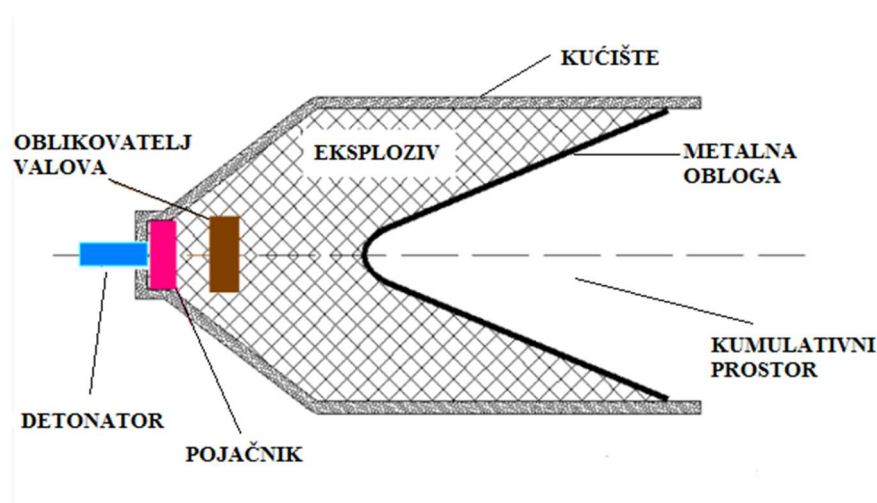
Birkhoffov model (stacionarni model) prvi je model koji je opisao princip djelovanja kumulativnih rezača sa pretpostavkom da je brzina urušavanja obloge ujednačena. Suprotno ovom modelu nastaje tzv. PER teorija koja se zasnivala na nestacionarnom gibanju materijala obloge pa je tako zamijenila Birkhoffov stacionarni model. Ova teorija omogućila je razvoj jednodimenzionalnih kodova koji su služili za jednostavnu analizu parametara kumulativnih naboja. Razvojem numeričkih metoda koje se još i danas razvijaju moguće je simulirati sve procese koji su povezani sa kumulativnim nabojem, od iniciranja, urušavanja metalne obloge pa sve do formiranja kumulativnog mlaza i njegova djelovanja na metu. Važno je napomenuti kako je simulaciju neophodno potvrditi eksperimentalnim ispitivanjem. Današnja ispitivanja temelje se na pronalasku novih materijala i geometrijskih značajki kumulativnih naboja u svrhu postizanja veće učinkovitosti (Bohanek 2013).

3. NAČIN DJELOVANJA KUMULATIVNIH NABOJA I NJIHOVA PODJELA

Na djelovanje kumulativnih naboja utječe oblik kumulativnog naboja te pojedini konstrukcijski parametri oblika i materijala obloge i eksplozivno punjenje eksplozivnih naboja. U nastavku je prikazan način djelovanja kumulativnih naboja te njihova podjela.

3.1. Način djelovanja

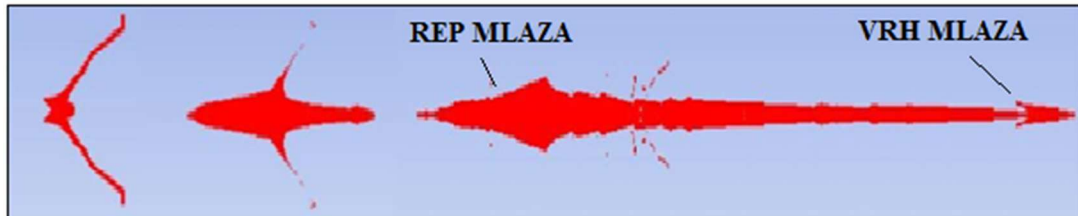
Kumulativni eksplozivni naboj je cilindar sa eksplozivom koji na jednom svom kraju ima detonator a na drugom kumulativni prostor. Na Slici 3.1 prikazan je izgled presjeka kumulativnog naboja. U uvodnom dijelu naglašeno je da kumulativni naboji imaju mogućnost usmjeravanja energije koja je oslobođena detonacijom te da se po tom svojstvu razlikuju od ostalih naboja. Produkte odnosno energiju nastalu detonacijom eksploziva moguće je usmjeriti izradom kumulativnog prostora u eksplozivnom punjenju. Usmjeravanjem energije detonacije stvara se intenzivna i lokalizirana sila koja je usmjerena na ciljani objekt. Nastala koncentrirana sila stvara veće udubljenje u meti od cilindra eksploziva bez kumulativnog prostora iako sadrži veću količinu eksploziva.



Slika 3-1. Shematski prikaz poprečnog presjeka kumulativnog eksplozivnog naboja (Elshenawy, 2012)

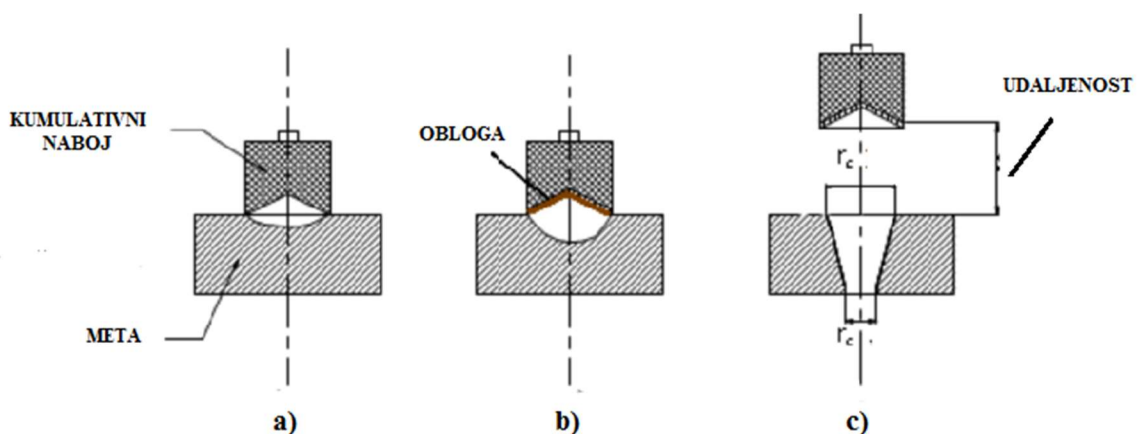
Učinak kumulativnog naboja na ciljani objekt dodatno se može povećati ukoliko se kumulativni prostor obloži tankim slojem duktilnog materijala. Obloga formira mlaz pri detonaciji eksplozivnog naboja koji penetrira u ciljani objekt. Također, obloga je izvor teških ubrzanih molekula čija masa povećava kinetičku energiju mlaza. Nakon detonacije kumulativnog naboja, sferni val širi se prema van u smjeru od točke iniciranja. Tlak koji nastaje eksplozivnom detonacijom izuzetno je visok te potiskuje materijal obloge što

rezultira njegovim sudarom s dugim urušenim elementima obloge i tako stvara mlaz velike brzine (tzv. hipersonična brzina). Pod djelovanjem tako iznimno visokog pritiska brzina vrha mlaza (eng. *tip*) biti će oko 9 km/s, dok će tzv. rep mlaza koji se još naziva i puž (eng. *tail*) kretati brzinom oko 2 km/s (Slika 3.2).



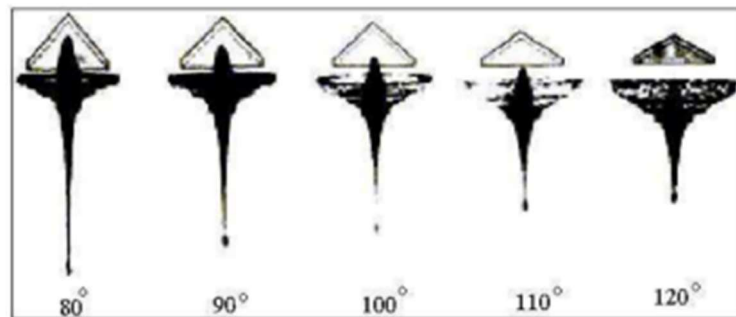
Slika 3-2. Rušenje obloge i nastanak mlaza (Bohanek, osobna arhiva)

Dodatno povećanje učinka, već tako iznimno energičnog mlaza pri udaru u ciljani objekt (metu), ostvaruje se udaljavanjem kumulativnog naboja za određeni iznos udaljenosti od objekta kao što je prikazano na Slici 3-3. Učinak se poboljšava do određene udaljenosti koja se naziva optimalnom. Ukoliko se ta udaljenost premaši, učinak opada jer dolazi do slabljenja i raspada mlaza. Na slici 3-3. a) prikazana je šupljina uzrokovana upotrebom kumulativnog naboja bez obloge, te uočavamo da je u tom slučaju nastala šupljina najmanja. Koristeći obloženi kumulativni prostor b) nastala šupljina značajno je veća nego u slučaju kada je korišten naboj bez obloge kumulativnog prostora. I konačno, udaljavanjem kumulativnog naboja c), šupljina koja je nastala veća je 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. Različiti učinci kumulativnog naboja i njihov princip djelovanja (Elshenawy, 2012)

Kako je materijal obloge kumulativnog prostora u vrlo kratkom vremenu izložen ekstremno visokim naprezanjima, temperaturama i tlakovima potrebno je pravilno odabrati oblik i vrstu materijala obloge u cilju postizanja što boljih karakteristika nastalog mlaza. Postoje mnogi oblici koji mogu proizvesti različite karakteristike mlaza, a neki od njih su stožasti, poluokrugli, obloge u obliku zvona itd. Tako primjerice stožaste obloge imaju dublje prodiranje sa malim promjerom rupe dok obloge u obliku zvona proizvode plitko prodiranje sa većim promjerom rupe. Geometrija stošca određena je kutom njegova vrha, pa ukoliko je taj kut mali, mlaz će biti duži, tanji i prodorniji. Povećanjem kuta, mlaz postaje sve kraći, deblji i manje prodoran (Slika 3-4.).



Slika 3-4. Utjecaj kuta stožaste obloge na karakteristike mlaza (Elshenawy,2012)

Jednako bitno obliku je i odabir vrste materijala obloge. Ponašanje metala nakon djelovanja detonacijskog udara, pretpostavlja se da je fluidno. Na temelju ove pretpostavke kao materijal obloge najviše se koriste metali visoke gustoće. Što je veća gustoća, to je veći udio potencijalne energije. U nastavku je prikazana Tablica 3-1. u kojoj su metali poredani od najboljeg prema najlošijem, gdje su rezultati 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

3.2. Podjela kumulativnih eksplozivnih naboja

Kumulativni eksplozivni naboji dijele se s obzirom na oblik, funkciju i način usmjeravanja produkata detonacije. Prema navedenim kriterijima podijeljeni su na:

- linijske kumulativne naboje ili rezače (engl. *linear shaped charge-LSC*)
- konusne kumulativne eksplozivne naboje (perforatore)

3.2.1. Linijski kumulativni naboji ili rezači

Linijski kumulativni naboji ili linijski kumulativni rezači su kumulativni naboji kod kojih je jedna dimenzija veća od druge, a ta dimenzija najčešće je duljina. Namijenjeni su za rezanje. Energija detonacije usmjerena je u pravac dok je obloga izdužena u pravcu dulje osi. Njihova upotreba započinje 1950. godine. Slika 3-5. prikazuje linijski kumulativni naboj i njegov efekt u čeličnoj ploči. Rezač je postavljen na čeličnu ploču debljine 3 cm bez razmaka od same ploče, te je ljepljivom trakom pričvršćen za čelik kako bi se spriječilo slučajno pomicanje rezača.



Slika 3-5. Linijski kumulativni naboj: a) kumulativni rezač i b) njegov učinak na čeliku (Duan et al., 2017)

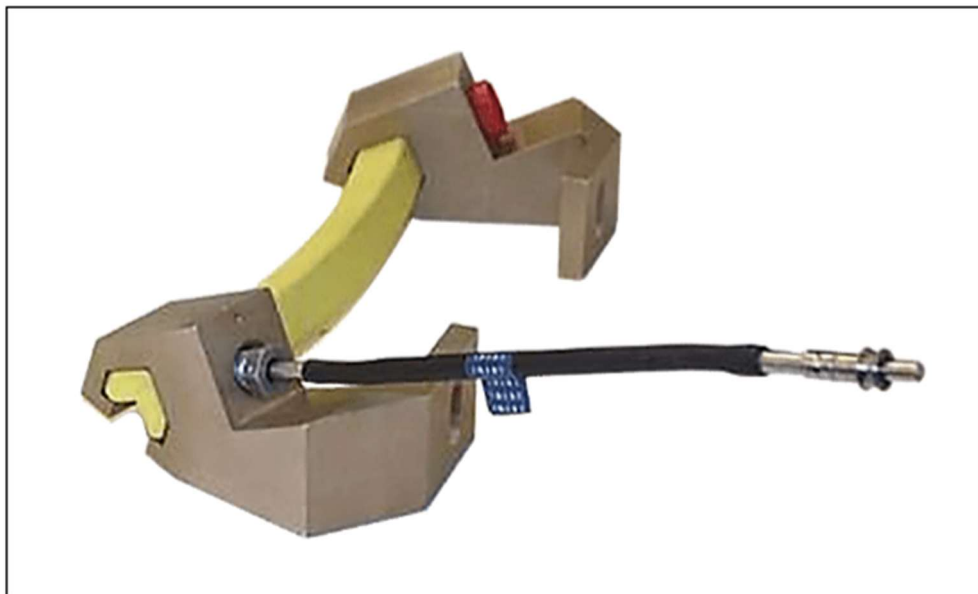
Gledajući učinkovitost kumulativnih rezača, ona se izražava kao maksimalna debljina materijala, ciljanog objekta, u ovom slučaju to je čelična ploča, koju rezač može prerezati. Primarni mehanizam djelovanja linijskog kumulativnog rezača je penetracija ubrzanе obloge. U trenutku nailaska obloge na čelik tlak djelovanja obloge je značajno veći od tlačne čvrstoće materijala. Dolazi do bočnog razmaka u čeliku te mlaz penetrira i oblikuje rez u čeličnoj ploči. Do smanjenja kinetičke energije mlaza dolazi uslijed plastične deformacije

čelika i otpora prodiranju. Djelovanjem tlačnih udarnih valova nastaje sekundarni mehanizam koji se odražava nastankom pukotina u čeliku nakon penetracije. Zbrojem djelovanja primarnog i sekundarnog mehanizma dobiva se ukupna debljina materijala koju kumulativni rezač može prerezati (Bohanek 2013).

Linijski kumulativni rezači dijele se na krute linijske rezače i savitljive rezače. Slika 3-6. prikazuje savitljivi rezač i prerezanu cijev nakon njegove detonacije, dok Slika 3-7. prikazuje kruti linijski kumulativni rezač. Pomoću savitljivih rezača mogu se rezati metalne konstrukcije različitih oblika što je ujedno i njihova prednost u odnosu na krute linijske kumulativne rezače. Dubina reza im je nešto manja od one načinjene krutim linijskim rezačem.



Slika 3-6. Savitljivi linijski kumulativni rezač i cijev prerezana njegovom detonacijom (Bohanek, 2013)



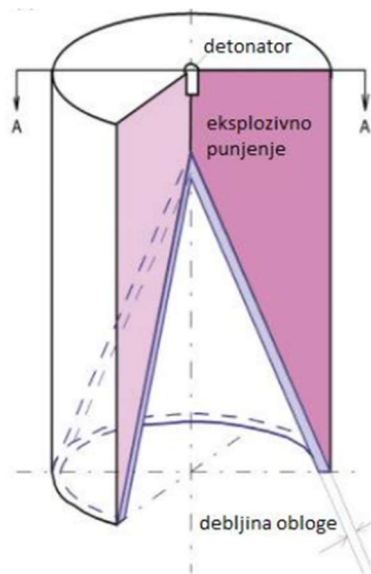
Slika 3-7. Kruti linijski kumulativni rezač (PACSCI EMC, 2021)

Rez kumulativnih rezača karakterizira precizna geometrija reza, lokalno rezanje i izostanak odbacivanja dijelova konstrukcije. Prednost rezanja metala uporabom kumulativnih rezača je:

- definirana dubina reza,
- precizno rezanje,
- manja masa potrebnog eksploziva,
- mogućnost miniranja kompliciranih uravnoteženi sustava (Hopfe,2001).

3.2.2. Konusni kumulativni eksplozivni naboji ili perforatori

Namijenjeni su za jednoosno probijanje objekta na koji djeluju. U odnosu na linijske kumulativne naboje kod kojih je sposobnost njihova djelovanja određena maksimalnom debljinom koju rezač može presjeći, sposobnost konusni kumulativnih naboja definirana je dubinom perforacije. Na Slici 3-8. nalazi se grafički prikaz konusnog kumulativnog naboja, a Slika 3-9. donosi prikaz učinka jednog takvog naboja nakon detonacije.



Slika 3-8. Konusni kumulativni eksplozivni naboj (Zhang, 2016)



Slika 3-9. Učinak konusnog kumulativnog eksplozivnog naboja na meti nakon detonacije (Applied Explosives, 2008).

Uglavnom se koriste u vojnom području i naftnoj industriji. Opis postupka perforiranja u naftnoj industriji, primjena u vojnom području kao i primjena linijskih kumulativnih naboja u industrijama detaljno je opisana u poglavlju 4.

4. PRIMJENA KUMULATIVNIH EKSPLOZIVNIH NABOJA U INDUSTRIJI

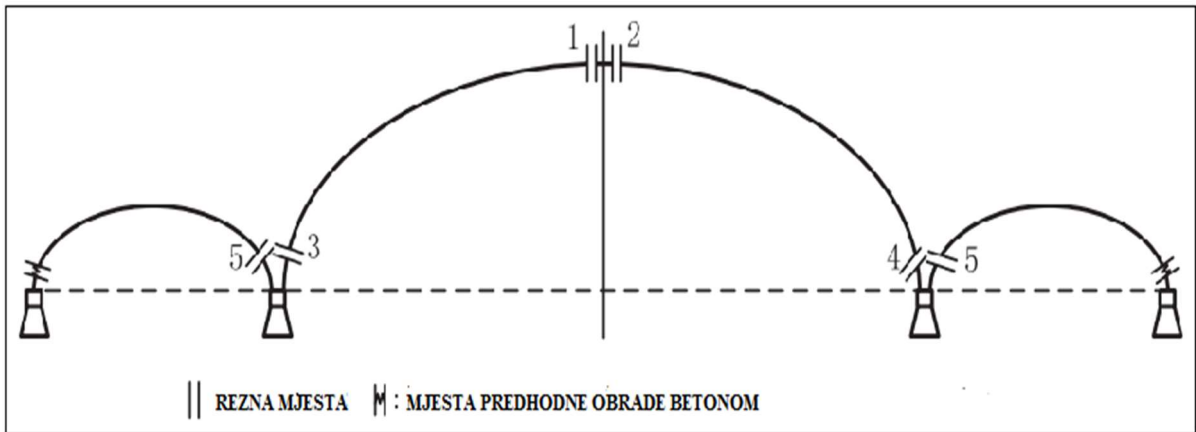
4.1. Primjena kumulativnih naboja u rudarstvu i građevinarstvu

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).

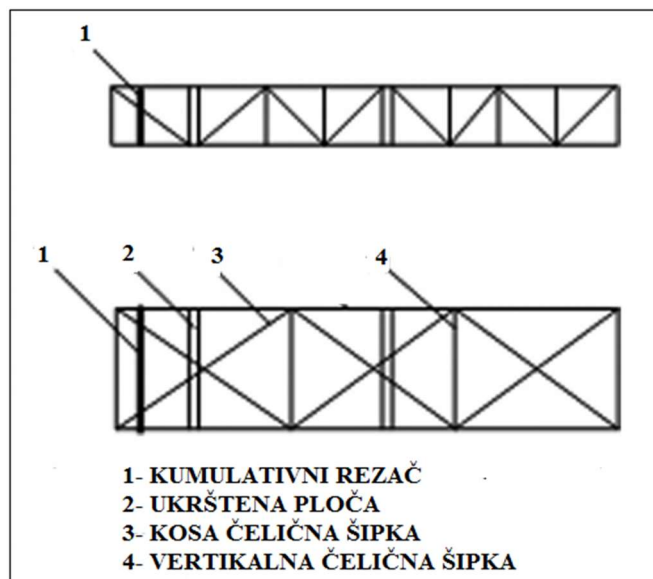
Upotrebljavaju se za rušenja građevinskih strojeva u slučaju ako demontaža klasičnim postupcima nije isplativa, usitnjavanje metalnih profila, rušenje objekata metalne ili betonske konstrukcije kao što su mostovi, zgrade, dizalice i slično. Jedna takva upotreba kumulativnog naboja, prilikom rušenja mosta Qinghemen opisana je u nastavku teksta. Čelične konstrukcije moguće je uklanjati i eksplozivom na klasičan način, ali primjenom kumulativnog naboja ostvaruje se bolja iskorištenost eksplozivnog punjenja te veći učinak sa manjom potrošnjom eksploziva. Smanjuju se štetni utjecaji miniranja kao što su seizmički utjecaji miniranja, zračni udar i buka, a sve je to veoma bitno u slučaju ako se rušenje izvodi u urbanim područjima i postoji mogućnost od oštećenja okolnih objekata.

Čelični lučni most Qinghemen izrađen je 1980-ih. Uslijed učestalih preopterećenja nastale su pukotine, te je most klasificiran kao opasan i trebalo ga je srušiti. Most se sastojao od tri luka s većim srednjim i dva simetrična bočna luka. Donja konstrukcija mosta sastojala se od ugrađenih armirano-betonskih stupova. Gornja konstrukcija mosta bila je obliku luka s tankim stijenkama promjenjivog presjeka koje nisu bile zglobno spojene. Cijeli most imao je dužinu od 234,4 metra i širinu 12 metara. Uzimajući u obzir nosivost i radne uvijete, čeličnu konstrukciju trebalo je prerezati na vrhu glavnog luka sa obje strane i na zajedničkom dnu bočnih lukova i glavnog luka. Obje baze bočnih lukova, prethodno je bilo potrebno umjetno obraditi betonom (Slika 4-1.). Točke 1-5 označavaju redosljed iniciranja gdje će prvo biti inicirani naboji na vrhu glavnog luka (točke 1 i 2), a zatim oni koji se nalaze na zajedničkom dnu bočnih lukova i glavnog luka (točke 3,4 i 5).



Slika 4-1. Plan rušenja čeličnog lučnog mosta Qinghemen (Duan et al., 2017)

Čelična konstrukcija ovog mosta bila je sastavljena od kutnog čelika i čeličnih šipki. Kumulativni rezači bili su pričvršćeni na čelik duž poprečnog položaja (1) (Slika 4-2.).



Slika 4-2. Kostur čelične konstrukcije i raspored kumulativnih rezača (Duan et al., 2017)

Prije samog miniranja, eksplozija je testirana na drugom mjestu gdje se vodilo računa o odgovarajućim količinama eksploziva i iniciranju naboja. Rezultat je ukazao da je količina eksploziva na neke dijelove konstrukcije prevelika. Udarni val i vibracije bile su značajno iznad dopuštenih granica. Na osnovu rezultata ovog testa, količina eksploziva prilagođena je u ovisnosti o veličini rezne komponente te je pojačana zaštita od štetnih rezultata na okolinu. Na Slici 4-3. prikazano je rušenje mosta, gdje je (a) eksplozija naboja, (b) trenutak

kada je most presječen, (c) početak urušavanja mosta, (d) trenutak kada je most srušen).
Slika 4-4. prikazuje urušenu komponentu čelične konstrukcije nakon miniranja.



Slika 4-3. Postupak rušenja mosta (Duan et al., 2017)



Slika 4-4. Urušena komponenta čelične konstrukcije (Duan et al., 2017)

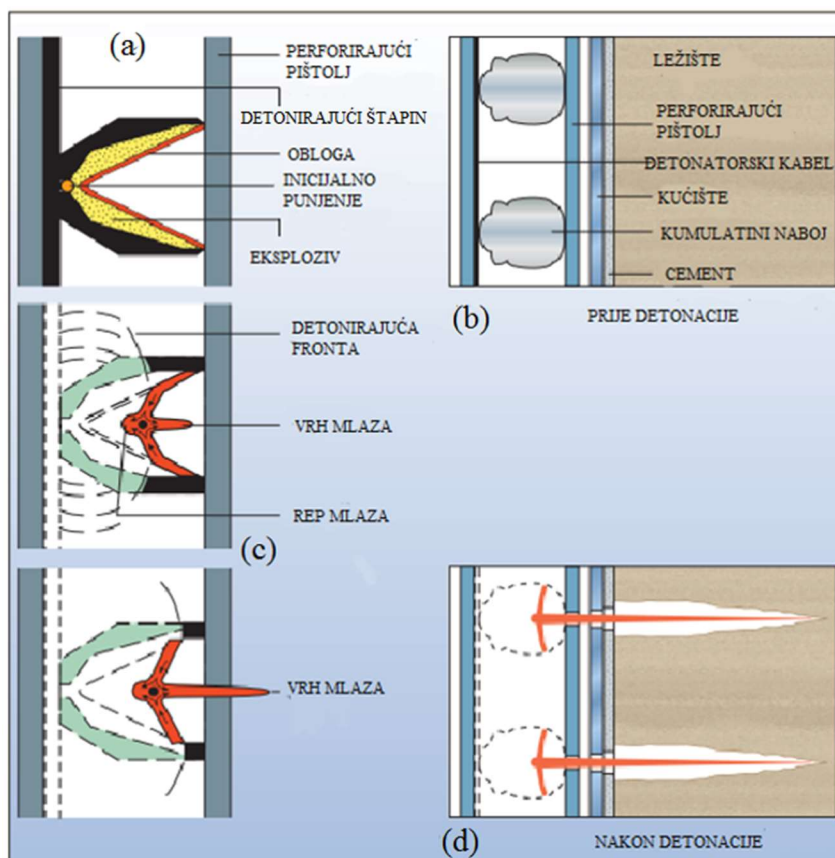
U Republici Hrvatskoj primjenom linijskih kumulativnih naboja rušeno je nekoliko objekata. U sklopu tehnološkoga projekta uporabe linijskih kumulativnih naboja u razdoblju 2004. i 2005. godine srušeni su sljedeći objekti:

- dizalica za transport koksa i kamena s pećima za proizvodnju kreča, Beli Manastir,
- Dopol, sustav dimnjaka u bivšoj tvornici glinice na Bravaru, Obrovac i
- plovna dizalica “Drenova“ na Malom Lošinju (Sućeska et al. 2005).

4.2. Primjena kumulativnih naboja u naftnoj industriji

Glavna primjena linijski kumulativnih naboja u naftnoj industriji je pri rezanju cijevi cjevovoda, bušotinskih cijevi te dijelova čelične konstrukcije platforme, te s obzirom na tako široku primjenu, velike naftne kompanije razvile su vlastite proizvodne pogone kumulativnih eksplozivnih naboja. Najveća potrošnja odnosi se na konusne kumulativne perforatore a nešto manja je potrošnja linijski kumulativnih rezača.

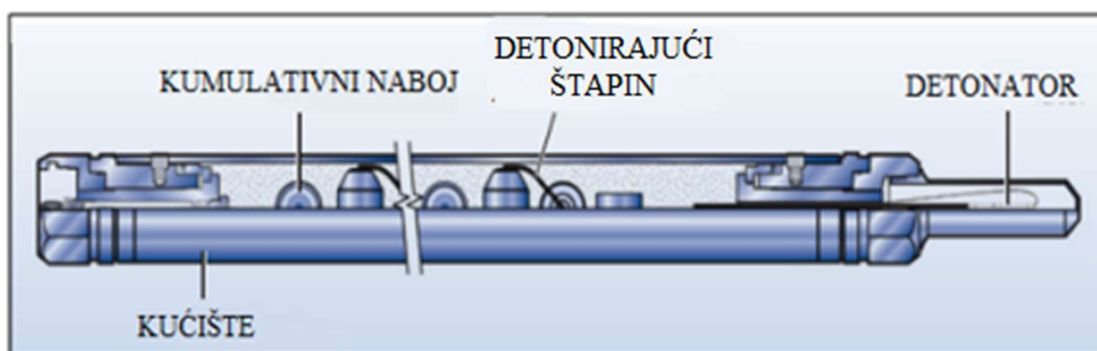
Nakon bušenja naftne bušotine, u bušotinu se postavlja čelična cijev koja se cementira. Zatim se uređaj za perforiranje (perforirajući pištolj) spušta u bušotinu do tzv. proizvodne dubine pomoću tankog metalnog kabela, kroz koji se prenosi električni signal koji dovodi do paljenja eksplozivnog naboja smještenog u uređaju za perforiranje. Perforiranje je dakle postupak kojim se izrađuju šupljine kroz čelične cijevi, cement i stijenu. Proces je iznimno brz te o njemu ovisi dugoročna održivost i profitabilnost većine ležišta nafte i plina. Nastale šupljine služe kao poveznica kroz koje fluid iz ležišta teče prema bušotini i dalje prema površini. Slika 4-5. prikazuje proces od trenutka kada je uređaj za perforiranje spušten u bušotinu na željenu dubinu do trenutka detonacije kumulativnog naboja i reakcije koja nastaje nakon detonacije.



Slika 4-5. Proces perforacije i detonacija kumulativnog naboja (Smithson, 2012)

Kumulativni naboj (a) sastoji se od vanjskog kućišta u kojem se nalazi inicijalno punjenje, eksploziv i konusna obloga. Punjenje služi kao veza između detonirajućeg štapina i eksploziva u kumulativnom naboju. Detonatorski kabel pojedinačno povezuje kumulativne naboje (b), i kada detonira, dolazi do lančane reakcije gdje obloga usmjerava energiju eksploziva u mlaz (c). Mlaz putuje iznimno velikom brzinom te tako stvara perforirane šupljine koje prodiru u kućište, cement i stijenu (d).

Uređaja za perforiranje ima u raznim izvedbama i veličinama. Veći uređaji imaju više eksplozivnog punjenja i veću gustoću stvorenih šupljina po jedinici dužine. Slika 4-6. prikazuje izgled jednog takvog uređaja za perforiranje koji se još naziva i perforirajući pištolj.

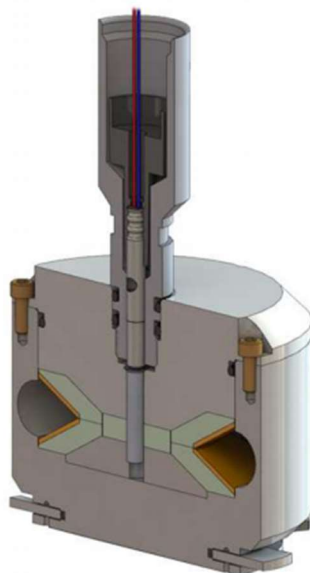


Slika 4-6. Uređaj za perforiranje (Smithson, 2012)

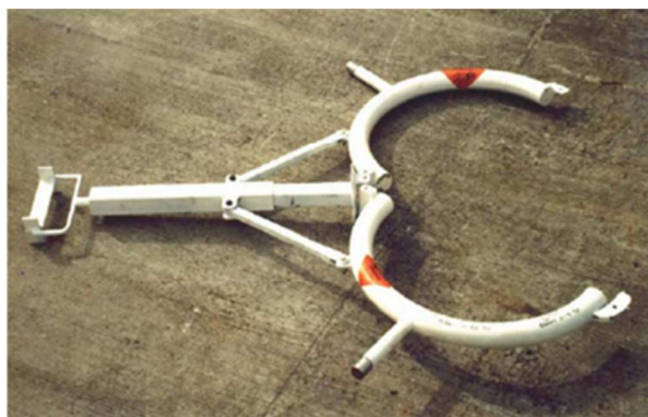
Perforiranje se izvodi eksplozivima visoke kvalitete koji su uglavnom sekundarni te se moraju inicirati drugim eksplozivima. U tu svrhu koriste se detonatori koji se iniciraju električnom energijom ili mehanički. Većina detonatora se inicira prilikom prolaska struje preko premaza, što dovodi do paljenja zapaljive glavice i iniciranja smjese primarnog punjenja olovnog azida. Kod mehanički iniciranih detonatora kapica je spojena s detonirajućim štapinom pri čemu dolazi do nastanka udarnih valova koji iniciraju punjenje u perforatoru te krajnji rezultat je nastanak perforacijskih šupljina.

Upotreba linijskih kumulativnih naboja najčešća je kod rezanja bušotinskih cijevi. Njihova primjena je najefikasnija, a često i jedino moguće rješenje. Dizajnirani su tako da se mogu sigurno spustiti po unutarnjem obodu cijevi te su smješteni u čelično kućište zbog kojeg mogu djelovati pri visokim temperaturama i tlakovima koji su prisutni u bušotinskim cijevima. Kružni linijski rezači koriste se za rezanje cijevi koje se nalaze na površini ili pod vodom, a postavljeni su uz vanjski plašt cijevi. Njihova prednost je u jako velikoj brzini

rezanja i promjer cijevi koje ovi rezači mogu prerezati je neograničeno velik. Na Slici 4-7. prikazan je linijski kumulativni rezač za rezanje bušotinskih cijevi, dok Slika 4-8. prikazuje kružni linijski rezač za podvodnu upotrebu (Bohanek, 2013).



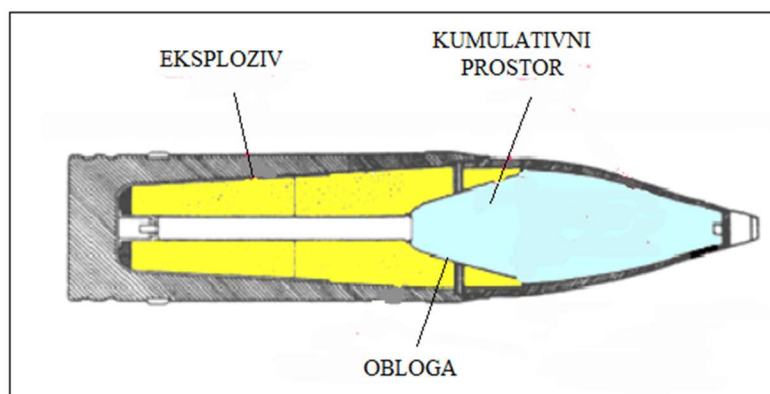
Slika 4-7. Linijski kumulativni rezač za rezanje bušotinskih cijevi (Bohanek, 2013)



Slika 4-8. Kružni rezač (Bohanek, 2013)

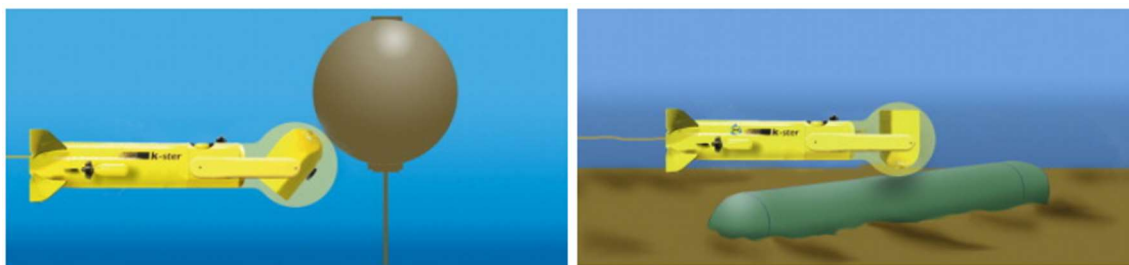
4.3. Primjena kumulativnih naboja u vojnoj i svemirskoj industriji

Vojna industrija kumulativne naboje koristi u kumulativnom oružju, pri rušenju objekata uklanjanjem čeličnih i armirano betonski konstrukcija, razminiranju, probijanju otvora u zidovima itd. Kumulativni projektil je strjeljivo koje kumulativnim učinkom djeluje na oklopni cilj te ga tako uništava. Jedan takav projektil je HEAT (High explosive anti-tank warhead) (Slika 4-9.). Projektil je punjen snažnim eksplozivom RDX-om ili njegovom mješavinom s TNT-om. U prednjem dijelu projektila nalazi se kumulativni prostor stožastog oblika obložen bakrom. Sudarom projektila s oklopom, eksploziv se aktivira, dolazi do koncentriranja energije eksplozije u jednu točku uslijed prisutnosti kumulativnog prostora te tako nastali mlaz prolazi kroz oklop.



Slika 4-9. Kumulativni projektil (Guns vs Armour)

Kod razminiranja kumulativni rezači se primjenjuju za neutralizaciju neaktiviranih mina i bojevi glava. Mornarice koriste posebno dizajnirana podvodna vozila (Slika 4-10.) opremljena kumulativnim eksplozivnim nabojem za neutralizaciju mina koje su tijekom ratova bačene i zaostale na dnu morske luke i sl. Takva vozila su optičkim vlaknom vezana s brodom ili površinskom platformom a operater ih usmjerava prema cilju. Detonacijom kumulativnog naboja koji je smješten na prednji dio vozila dolazi do neutraliziranja mine.



Slika 4-10. Podvodna neutralizacija mina i bojevih glava (Christ i WernliSr, 2014)

Kod razminiranja bojevih glava, linijski kumulativni rezač omogućuje presijecanje metalne obloge projektila te sagorijevanje eksplozivnog punjenja bojeve glave bez da ona detonira (Kim et al., 2003). Takva jedna primjena na terenu prikazana je na Slici 4-11.



Slika 4-11. Neutralizacija mina i bojevih glava na kopnu (Bohanek, 2013)

U vojnoj industriji za probijanje otvora u zidu koriste se kumulativni rezači koji su smješteni u okvire namijenjene u tu svrhu. Jedan takav linijski kumulativni rezač namijenjen za probijanje otvora u zidu prikazan je na Slici 4-12.



Slika 4-12. Kumulativni rezač za probijanje otvora u zidu (Bohanek, 2013)

Svemirska industrija kumulativne naboje koristi za razdvajanje pojedinih dijelova pri lansiranju (raketni spremnici goriva, pojedini stupnjevi raketnog motora) te za izrezivanje i odbacivanje dijelova oplata. NASA (National Aeronautics and Space Administration) intenzivno ulaže sredstva za istraživanja i ispitivanja kumulativnih naboja.

Ares I-X tim je proveo uspješno ispitivanje razdvajanja dijela rakete koji se naziva frustum. Test je simulirao razdvajanje koje se događa 2 minute nakon polijetanja. Donja polovica rakete se odvaja od gornje na dijelu koji se naziva frustum. Frustum ima oblik naopakog stošca i spaja manju gornju polovicu rakete s većom donjom polovicom. Tijekom razdvajanja kumulativni naboj detonira na donjem dijelu frustuma, donja polovica pada na Zemlju te se ponovno koristi za druga polijetanja. Na slici 4-13. prikazano je odvajanje donjeg dijela rakete uporabom linijskog kumulativnog rezača prilikom testa Ares I-X tima i razdvajanje 2 minute nakon njezinog polijetanja (NASA, 2021).



Slika 4-13. Upotreba linijskog kumulativnog rezača pri razdvajanju donjeg dijela rakete (NASA, 2021)

5. ZAKLJUČAK

Ovaj rad nastojao je prikazati povijesni razvoj kumulativnog naboja koji započinje još u 18. stoljeću. Zbog velikog broja usporednih ispitivanja i činjenice da su se ispitivanja uglavnom provodila za vojne namjene pa su rezultati ispitivanja bili tajni, ne može se sa sigurnošću reći tko je prvi i kada otkrio učinak kumulativnog naboja. Zatim je dan uvid u sam princip rada kumulativnog naboja koji su podijeljeni na linijske kumulativne rezače i konusne kumulativne naboje odnosno perforatore, čija se razlika očituje u načinu usmjeravanja energije u točku kod perforatora, odnosno pravac kod linijski rezača. Podatci o linijskim kumulativnim rezačima manje su zastupljeni u literaturi u odnosu na konusne kumulativne naboje. Brojni podatci o konusnim nabojima omogućili su bolje razumijevanje djelovanja linijski kumulativnih rezača. Poseban naglasak bio je na primjeni kumulativnih naboja u raznim industrijama kao što su vojna, svemirska, naftna te primjena u rudarstvu i građevini. Za svaku industriju koja je spomenuta u radu naveden je primjer njihove primjene naboja na terenu kao i ostali oblici upotrebe. Istraživanja i razvoj kumulativnih naboja provode se i danas s naglaskom na povećanje učinkovitosti u cilju postizanja najveće dubine reza uz najmanju masu a da utjecaj na okolinu bude što manji.

6. LITERATURA

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

Applied Explosives, 2008. Product Catalogue

URL: <http://www.appliedexplosives.com/> (24.8.2021.)

BOHANEK, V., 2013. Model nastajanja i analiza djelovanja kumulativnoga procesa linearnih eksplozivnih naboja, Doktorski rad, Rudarsko – geološko naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu.

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

CHRIST, R. D., WERNLISR, R. L., 2014. In The ROV Manual (Second Edition).

DUAN, B., ZHOU, Y., ZHENG, S., BAO, M., WANG, L., & DONG, J., 2017. Blasting demolition of steel structure using linear cumulative cutting technology. Advances in Mechanical Engineering, 9(11), 1687814017729089.

ELSHENAWY, T.A.E., 2012. Criteria of design improvement of shaped charges used as oil well perforators. The University of Manchester (United Kingdom).

GALANTE E., HADDAD,A., MARQUES,N., 2013. Application of Explosives in the Oil Industry. International Journal of Oil, Gas and Coal Engineering. Vol. 1, No. 2, pp. 16-22. doi: 10.11648/j.ogce.20130102.11.

Guns vs Armour. Shaped Charge Ammunition, 2000.

URL: <http://amizaur.prv.pl/www.wargamer.org/GvA/background/ammotypes11.html>

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.

NASA. Successful First Stage Frustum Separation Test.

URL: https://blogs.nasa.gov/Ares_I-X/tag/atk/ (1.9.2021.)

PacSci EMC. Linear Shaped Charge.

URL: <https://psemc.com/products/linear-shaped-charge/> (27.8.2021.)

SMITHSON, T. 2012. Defining Perforating: Detonation for Delivery. Oilfield Review, 24(1), 55-56.

SUĆESKA, M., 2001. Eksplozije i eksploziv - njihova mirnodopska primjena. Brodarski institut, Zagreb.

SUĆESKA, M., RAJIĆ LINARIĆ, M., MATEČIĆ MUŠANIĆ, S., BAKIJA, S., KOLLAR, R. & MAJOR, S., 2005. Razvoj kumulativnih eksplozivnih naboja i postupaka za eksplozivno rušenje objekata. Tehnologijski projekt, Brodarski institut, Zagreb.

WALTERS, W.P., 2008. A Brief History of Shaped Charges. A reprint of the keynote paper from the 24th International Symposium on Ballistics, New Orleans, LA, Vol. 1, 3–10.

ZHANG, Z., 2016. Rock fracture and blasting: Special blasting techniques. Oxford, Ujedinjeno Kraljevstvo: Butterworth-Heinemann.



KLASA: 602-04/21-01/152
URBROJ: 251-70-11-21-2
U Zagrebu, 13.09.2021.

Toni Jurić, student

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-04/21-01/152, URBROJ: 251-70-11-21-1 od 29.04.2021. priopćujemo vam temu završnog rada koja glasi:

PRIMJENA KUMULATIVNIH 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

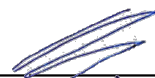
Voditelj


(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Vječislav Bohanek

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za
završne i diplomske ispite:

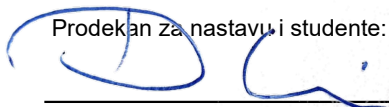


(potpis)

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)