Izrada 3D modela strukture ANFO-eksploziva

Andročec, Ana

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

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:169:456319

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

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



Repository / Repozitorij:

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Preddiplomski studij rudarstva

IZRADA 3D MODELA STRUKTURE ANFO-EKSPLOZIVA

Završni rad

Ana Andročec

R4305

Zagreb, 2020.

KLASA: 602-04/20-01/97
URBROJ: 251-70-03-20-2
U Zagrebu, 16.09.2020.

Ana Andročec, studentica

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju Vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-04/20-01/97, UR.BR. 251-70-12-20-2 od 28.04.2020. godine priopćujemo temu završnog rada koja glasi:

IZRADA 3D MODELA STRUKTURE ANFO-EKSPLOZIVA

Za voditelja ovog završnog rada imenuje se u smislu Pravilnika o završnom ispitu doc. dr. sc. Vinko Škrlec, docent Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Voditelj

(potpis)

Doc. dr. sc. Vinko Škrlec

(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)

Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Završni rad

IZRADA 3D MODELA STRUKTURE ANFO-EKSPLOZIVA

Ana Andročec

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

Sažetak

U završnom radu je prikazana općenita podjela eksploziva. Iz gospodarskih eksploziva, s obzirom na najveću zastupljenost prilikom izvođenja gospodarskih miniranja, je izdvojen ANFO eksploziv te su navedene njegove glavne karakteristike i svojstva. Opisan je postupak izrade 3D modela strukture ANFO-eksploziva u programu „AutoCad“ te je model isprintan na 3D printeru.

Ključne riječi: eksploziv, amonijev nitrat, ANFO eksploziv, AutoCad

Završi rad sadrži: 42 stranice, 6 tablica, 23 slike i 20 referenci.

Jezik izvornika: Hrvatski

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

Mentor: Dr. sc. Vinko Škrlec, docent RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Vinko Škrlec, docent RGNF
Dr. sc. Mario Dobrilović, izvanredni profesor RGNF
Dr. sc. Siniša Stanković, docent RGNF

Datum obrane: 22. rujna 2020., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

SADRŽAJ

1. UVOD 1

2. EKSPLOZIV 2

2.1. Podjela eksploziva prema karakteru eksplozije 5

2.2. Podjela eksploziva prema namjeni 6

2.3. Podjela eksploziva prema agregatnom stanju 6

2.4. Podjela eksploziva prema obliku 7

2.5. Podjela eksploziva prema konzistenciji 7

2.6. Podjela eksploziva na eksplozivne smjese i monomolekularne eksplozive 8

2.7. Podjela eksploziva na inicijalne i brizantne 9

2.8. Podjela eksploziva prema sastavu i senzibilizatorima 10

3. ANFO EKSPLOZIVI 12

3.1. Amonijev nitrat (AN) 13

3.2. Svojstva ANFO eksploziva 15

3.2.1. Gustoća 15

3.2.2. Brzina detonacije 15

3.2.3. Vodootpornost 16

3.2.4. Međudjelovanje s ugljenom i rudama metala 16

3.3. Procesi proizvodnje amonijeva nitrata 17

3.3.1. Granule AN za poljoprivrednu namjenu 18

3.3.2. Granule AN za industrijsku namjenu 19

3.4. Miješanje ANFO eksploziva 20

3.5. Iniciranje ANFO eksploziva 22

3.6. Pakiranje i upotreba ANFO eksploziva 23

3.7. Klasifikacija i skladištenje 25

3.8. Dodatak aluminija ANFO eksplozivima....26
4. IZRADA 3D MODELA STRUKTURE ANFO EKSPLOZIVA....28
4.1. Amonijev nitrat, $\boldsymbol{NH4NO3}$....28
4.1.1. Amonijev ion, $\boldsymbol{NH4+}$....29
4.1.2. Nitratni ion, $\boldsymbol{NO3-}$....30
4.2. Metilen, $\boldsymbol{CH2}$....32
4.3. Voda, $\boldsymbol{H2O}$....33
4.4. Ugljikov dioksid, $\boldsymbol{CO2}$....35
4.5. Dušik, $\boldsymbol{N2}$....36
4.6. 3D printer CraftBOT XL....38
5. ZAKLJUČAK....40
6. LITERATURA....41

POPIS TABLICA

Tablica 1. Karakteristike AN za gnojivo i AN za eksplozive (Ester, 2005).....14

Tablica 2. Utjecaj sadržaja goriva na gubitak ostvarene energije eksploziva tipa ANFO (Ester, 2005).....21

Tablica 3. Tehničke značajke 3D printera (CraftBot, 2017) 38

Tablica 4. Dimenzije printera (CraftBot, 2017).....38

Tablica 5. Temperaturne značajke (CraftBot, 2017) 39

Tablica 6. Značajke programske podrške (CraftBot, 2017) 39

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Eksplozija (Dobrilović, 2008) 2
Slika 3-1. Amonijev nitrat za proizvodnju ANFO eksploziva (https://medicroslavl.ru/) 14
Slika 3-2. Usporedba struktura standardnog i mikroporoznog amonijeva nitrata (Ester, 2005) 18
Slika 3-3. ANFO pakiranja u vreće (https://medicroslavl.ru/) 24
Slika 3-4. Proizvodnja ANFO eksploziva na mjestu upotrebe (http://dykonblasting.com/portfolio/weeping-water-quarry-quarry-blasting/) 25
Slika 4-1. Strukturna formula amonijeva nitrata (https://hr.wikipedia.org/wiki/Amonijev_nitrat) 28
Slika 4-2. Izrada amonijevog iona 29
Slika 4-3. Konačni izgled amonijeva iona 30
Slika 4-4. Izrada nitratnog iona 31
Slika 4-5. Konačni izgled nitratnog iona 31
Slika 4-6. Strukturna formula metilena (https://www.wikidata.org/wiki/Q11172462) 32
Slika 4-7. Izrada molekule metilena 32
Slika 4-8. Konačni izgled molekule metilena 33
Slika 4-9. Strukturna formula vode (https://socratic.org/questions/what-is-the-molecular-geometry-of-h2o-draw-its-vsepr-and-lewis-structure) 33
Slika 4-10. Izrada molekule vode 34
Slika 4-11. Konačni izgled molekule vode 34
Slika 4-12. Strukturna formula ugljikova dioksida (https://socratic.org/questions/how-can-i-draw-a-lewis-dot-diagram-for-carbon-dioxide) 35
Slika 4-13. Izrada molekule ugljikova dioksida 35
Slika 4-14. Konačni izgled molekule ugljikova dioksida 36
Slika 4-15. Strukturna formula dušika (https://www.omnicalculator.com/chemistry/bond-order) 36
Slika 4-16. Izrada molekule dušika 37
Slika 4-17. Konačni izgled molekule dušika 37
Slika 4-18. Molekula amonijevog nitrata tijekom 3D ispisa. 39

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I ODGOVARAJUĆIH SI JEDINICA

Simbol	Jedinica	Značenje
T	(K, °C)	temperatura
v	(kg/dm^3)	specifični volumen
p	(bar, Pa)	tlak
Q	(kJ/g)	toplina oslobođena detonacijom
D	(m/s)	brzina detonacije
ρ	(g/cm^3)	gustoća
m	(g)	masa
$\emptyset$	(mm)	promjer patrone
e	(kJ/kg)	specifična oslobođena energija

1. UVOD

Uporaba eksploziva za dobivanje mineralnih sirovina raznih namjena naveliko se širi svijetom. Razvojem nove generacije eksploziva, tipa mješavina granuliranog amonijeva nitrata i mineralnog ulja (ANFO) i emulzijskih eksploziva (ulja u vodi), kao i tehnike za izradu minskih bušotina, pojednostavljeno je praktično izvođenje radova, povećana je sigurnost na radu i smanjeni su troškovi eksploatacije (Ester, 2005).

Amonijev nitrat je prisutan kao glavna sastavnica u većini industrijskih eksploziva, uključujući praškaste eksplozive, želatine (dinamite), emulzije i vodene gelove. Uz rastuću potražnju za ekološkim gorivima bez klora, amonijev nitrat proizvodi potpuno ekološke proizvode bez dima. Osim toga, to je jedan od najjeftinijih i lako dostupnih spojeva.

ANFO eksplozivi su najrašireniji upotrebljavani civilni eksplozivi u svijetu. Masovno se primjenjuju na površinskim kopovima, kamenolomima i ostalim minerskim radovima. Kao prednosti ANFO eksploziva mogu se navesti jednostavna priprema, sigurnost u radu, niža cijena, mogućnost pripreme na mjestu upotrebe te strojno punjenje minskih bušotina eksplozivom.

U radu su predstavljene detaljne karakteristike ANFO eksploziva, a da bi pregled bio sveobuhvatan, uključen je i kratak opis i podjela eksploziva. Detaljno je prikazana i sama izrada 3D modela strukture ANFO eksploziva. Izradi 3D modela ANFO eksploziva pristupilo se kako bi se taj model mogao koristiti za potrebe izvođenja nastave iz kolegija Miniranje I.

2. EKSPLOZIV

Eksplozivi su stabilni kemijski spojevi ili smjesa spojeva koji imaju sposobnost da pod utjecajem određenog vanjskog impulsa u obliku topline, udara, trenja i sl. izazivaju ekstremno brzi proces oksidacije, odnosno detoniraju, razvijajući pritom znatnu količinu plinova i topline (Krsnik, 1989).

Nakon oslobađanja velike količine topline i nastajanjem zagrijanih plinovitih produkata pod tlakom mnogo većim od tlaka okoline, plinovi se brzo šire, pri čemu se dio potencijalne energije eksplozivne tvari pretvara u mehanički rad.



Kazalo:

A – inicijalni impuls (udar, plamen, toplina, trenje),

B – neporemećena eksplozivna tvar (T ≈ 20 °C, v ≈ 0,2-1,5 kg/dm^3, p ≈ 1 bar),

C – kemijski proces pretvorbe,

D – plinoviti produkti,

E – neporemećena eksplozivna tvar,

F – ekspanzija plinovitih produkata,

G – plinoviti produkti u ekspanziji (T ≈ 2000-5000 K, v ≈ 1000 kg/dm^3, p ≈ 10^5 bar,

Q ≈ 3,5-7,5 kJ/g) (Dobrilović, 2008).

Slika 2-1. Eksplozija (Dobrilović, 2008)

Ovisno o uvjetima iniciranja kemijskih reakcija i svojstvima eksplozivne tvari, reakcije eksplozivne kemijske pretvorbe mogu se odvijati dvama mehanizmima: sagorijevanjem i detonacijom. To su dva mehanizma bitno različita ne samo po brzini odvijanja, nego i po načinu prenošenja dijela oslobođene energije na neizreagirani dio eksplozivne tvari. Ovisno o željenoj namjeni i karakteristikama korištenih tvari, obje reakcije se koriste za dobivanje korisnog rada.

Prema tome eksplozivi mogu sagorijevati, sagorijevati eksplozivno (deflagrirati) i detonirati. Do sagorijevanja ili detonacije eksplozivne tvari dolazi zbog dovođenja energetskog impulsa koji inicijalno kida međumolekulske veze i potiče samoodrživu kemijsku reakciju slobodnih atoma s kisikom (Dobrilović, 2008).

Upotreba eksploziva je mnogostruka. Eksplozivom se koristi u vojne svrhe, u strojarstvu, automobilskoj i avioindustriji, čak i u medicini. Ipak se najviše eksploziva (u jedinicama mase) koristi u rudarstvu i građevinarstvu (Ester, 2005).

Osnovne značajke koje definiraju gospodarske eksplozive su:

- brzina detonacije,
- snaga ili radna sposobnost eksploziva,
- stabilnost detonacije,
- gustoća eksploziva,
- vodootpornost,
- osjetljivost na iniciranje,
- svojstva štetnog utjecaja na okolinu,
- sigurnost pri upotrebi i manipulaciji,
- otpornost na smrzavanje,
- ravnoteža ili balans kisika i
- postojanost tijekom skladištenja.

Brzina detonacije definira brzinu propagiranja detonacijskog fronta i kemijske promjene eksploziva. Za gospodarske (civilne) eksplozive iznosi približno od 2000 m/s do 7000 m/s (Dobrilović, 2008).

Snaga ili radna sposobnost eksploziva određuje se posrednim metodama u odnosu na referentni eksploziv, što je obično razorna želatina. Razorna želatina je smjesa nitroglicerina i nitroceluloze u masenom odnosu 92:8. Ispitne metode su Trauzlova proba i ispitivanje balističkim klatnom (Dobrilović, 2008).

Stabilnost detonacije podrazumijeva sposobnost formiranja i održavanja stabilnog detonacijskog procesa u stupcu eksplozivnog punjenja eksploziva, bez gubitka početnih detonacijskih parametara (Dobrilović, 2008).

Gustoća eksploziva je fizičko svojstvo eksplozivne tvari i za gospodarske eksplozive kreće se u granicama od 0,85 kg/dm^3 do 1,6 kg/dm^3 (Dobrilović, 2008).

Vodootpornost određuje mogućnost korištenja eksploziva u vlažnim sredinama ili za podvodna miniranja. Ona je uvjetovana kemijskim sastavom eksploziva i neke vrste eksploziva, kao što su emulzije, želatine i gelovi, nisu higroskopni i ne mijenjaju svoja eksplozivna svojstva u vodi. Eksplozivima osjetljivim na vodu, vodootpornost se može povećati patroniranjem u prikladne, vodootporne materijale patrona (Dobrilović, 2008).

Osjetljivost na iniciranje određena je kemijskim sastavom eksploziva i minimalnom energijom potrebnom za aktivaciju. Osjetljivost mora biti unutar granica koje osiguravaju sigurno rukovanje s jedne strane i mogućnost iniciranja standardnim inicijalnim sredstvima s druge strane. Prema potrebnoj energiji iniciranja, eksplozivi se dijele na osjetljive i neosjetljive na inicijalni impuls rudarske kapice br. 8. Za iniciranje neosjetljivih eksploziva, potreban je pojačnik ili patrona osjetljivog eksploziva (Dobrilović, 2008).

Utjecaj na okolinu manifestira se kroz vrstu i količinu nastalih plinova. Značajan utjecaj plinova je pri podzemnim radovima zbog ograničene količine zraka u kojem se nastali plinovi razrjeđuju. Zbog toga njihova koncentracija u zraku može porasti iznad dozvoljenih vrijednosti što zahtijeva dodatno vjetrenje. Kod površinskih miniranja, razrjeđenje plinova u zraku je brže, ali u prvim trenucima nakon miniranja opasne koncentracije mogu biti smrtne za ljude (Dobrilović, 2008).

Sigurnost rukovanja određena je neosjetljivošću eksploziva na vanjske impulse koji mogu nastati tijekom manipulacije i upotrebe eksploziva (Dobrilović, 2008).

Otpornost na smrzavanje je svojstvo postojanosti eksploziva na niskim temperaturama. Definira najnižu temperaturu pri kojoj se eksploziv može koristiti i pri kojoj zadržava sva zahtijevana eksplozivna svojstva (Dobrilović, 2008).

Ravnoteža ili balans kisika je kemijsko svojstvo eksploziva koje određuje vrstu nastalih plinova detonacije. Uz nedostatak kisika u strukturi eksploziva, nakon detonacije razvijaju se otrovni plinovi: ugljikov monoksid (CO) i dušikovi oksidi (NO_x) (Dobrilović, 2008).

S obzirom na vrijeme postojanosti eksplozivnih svojstava, definiran je rok upotrebe eksploziva (Dobrilović, 2008).

2.1. Podjela eksploziva prema karakteru eksplozije

Značajke procesa pretvorbe, produkata raspada i njihovo stanje (kao što je tlak, temperatura i volumen) te njihovo međudjelovanje sa sredinom u kojoj se eksplozija dogodila, definiraju i primjenu pojedinih eksplozivnih tvari. Prema tome eksplozivi se mogu podijeliti na:

- jake (engl. „*high explosives*“),
- slabe (engl. „*low explosives*“) i
- pirotehničke smjese.

Pod jake eksplozive spadaju sve vrste eksploziva koje u normalnoj upotrebi detoniraju. Njihova namjena se ostvaruje oslobođenom energijom detonacije i njezinom pretvorbom u mehanički ili razorni rad. Pri tome su u tu grupu uključeni svi eksplozivi takvih svojstava bez obzira na namjenu i kemijski sastav (Dobrilović, 2008).

U grupu slabih eksploziva spadaju baruti i propelanti. To su eksplozivi kojima je, pri normalnoj upotrebi, prvenstveni mehanizam kemijske promjene eksplozivno sagorijevanje. Obavljanje korisnog rada većinom se ostvaruje kroz potisno djelovanje stlačenih produkata raspada (Dobrilović, 2008).

U pirotehničke smjese svrstavaju se svi eksplozivni materijali koji ne ulaze u gornje dvije grupe, a proces njihove pretvorbe je sagorijevanje s prisutnošću kisika iz okoline ili eksplozivno sagorijevanje. Njihova primjena je različita od korištenja toplinske energije i plamena sagorijevanja. Pirotehničke smjese se prema namjeni dijele na: pirotehničke smjese za tehničku namjenu i pirotehničke smjese za zabavu (Dobrilović, 2008).

2.2. Podjela eksploziva prema namjeni

Eksplozivi i pirotehničke smjese mogu se grupirati na sljedeći način:

- eksplozivi i pirotehničke smjese za gospodarske (civilne) namjene i
- eksplozivi i pirotehničke smjese za vojne namjene.

Gospodarski eksplozivi se koriste za dobivanje mineralne sirovine, za civilna rušenja građevina, iskope itd. (Dobrilović, 2008).

U drugu grupu spadaju i jaki i slabi eksplozivi, odnosno eksplozivi, propelanti i pirotehničke smjese koji imaju svoju primjenu u vojne svrhe. Oni se koriste kao punjenja minsko-eksplozivnih sredstava i municije.

Pojedine eksplozivne tvari imaju primjenu i u vojne i u gospodarske svrhe. Pritom se razlikuju proizvodi u kojima su oni ugrađeni i, ovisno o primjeni, njihova uloga u procesu korištenja. Primjena eksplozivnih tvari u nabrojene svrhe uvjetovana je njihovim karakteristikama koje uključuju sigurnost, postojanost i cijenu koštanja (Persson et al, 1994).

2.3. Podjela eksploziva prema agregatnom stanju

Definira stanje pri kome tvar ima eksplozivna svojstva te u kojem stanju se primjenjuje:

- čvrsti,
- tekući i
- plinoviti.

2.4. Podjela eksploziva prema obliku

Osnovna podjela eksploziva prema obliku:

- tekući,
- u rasutom stanju i
- patronirani.

Tekući eksplozivi se u bušotinu upumpavaju s mobilnih postrojenja.

Eksplozivi u rasutom stanju pakiraju se u vreće ili se usipavaju u bušotinu iz mobilnih spremnika.

Patronirani eksplozivi pakiraju se u patrone koje su promjera od 25 mm do 90 mm i duljine do 1 m, a ovisno o vrsti eksploziva i mjestu primjene, ovitak patrona se izrađuje od parafinskog papira, plastičnih folija ili tvrde plastike (Dobrilović, 2008).

2.5. Podjela eksploziva prema konzistenciji

Podjela čvrstih eksploziva prema konzistenciji:

- kompaktni,
- granulirani,
- mljeveni,
- plastični,
- emulzije i gelovi.

Kompaktne eksplozive karakterizira čvrsta konzistencija. Oblik potreban za primjenu oblikuje se tehnološkim postupkom, i to najčešće lijevanjem. Predstavnik ove grupe je pentolit (Dobrilović, 2008).

Granulirani eksplozivi sastoje se od zrna ili kristala određene granulacije. Zrnati granulirani eksploziv je ANFO eksploziv, dok su kristalični granulirani eksplozivi obično u grupi

monomolekularnih eksploziva kao što su oktogen, heksogen i pentrit. Veličina zrna granulata ili kristala ovisi o fizikalnim svojstvima eksploziva i tehnološkom postupku proizvodnje (Persson et al, 1994).

Mljeveni eksplozivi dobivaju se usitnjavanjem ili granuliranih ili čvrstih eksploziva. Poznata je upotreba mljevenog amonijeva nitrata i mljevenog trotila.

Plastični eksplozivi u svome sastavu sadrže plastifikatore koji ima daju konzistenciju podobnu za upotrebu.

Emulzije i gelovi su kašaste konzistencije i u svome sastavu sadrže vodu.

2.6. Podjela eksploziva na eksplozivne smjese i monomolekularne eksplozive

S obzirom na kemijski sastav eksplozivi se mogu podijeliti na:

- monomolekularne eksplozive i
- eksplozivne smjese.

Monomolekularni eksplozivi su kemijske tvari sastavljene od jedne vrste molekula, odnosno jednog kemijskog spoja. Takvi spojevi imaju eksplozivna svojstva u čistom stanju i koriste se samostalno ili se kombiniraju s drugim spojevima zbog poboljšanja eksplozivnih svojstava (Dobrilović, 2008).

Eksplozivne smjese su smjese eksplozivnih i smjese neeksplozivnih komponenti. Smjese mogu biti: mješavine ili samo eksplozivnih komponenti ili eksplozivnih i neeksplozivnih komponenti ili smjese neeksplozivnih komponenti koje su zajedno eksplozivne. Pritom se u smjesama nalaze i monomolekularni eksplozivi i eksplozivne tvari.

2.7. Podjela eksploziva na inicijalne i brizantne

Kriterij za podjelu eksploziva u ovom slučaju su karakteristike koje definiraju položaj eksplozivne tvari u inicijalnom nizu, i shodno tome, nivo osjetljivosti eksploziva prema vanjskom impulsu bilo kojeg oblika (Dobrilović, 2008).

Primarni i sekundarni eksplozivi se odlikuju detonacijom kao osnovnim oblikom eksplozivne kemijske pretvorbe, iako sekundarni eksplozivi mogu pod određenim uvjetima stabilno sagorijevati. Njihovo djelovanje na okolinu stoga se očituje u vidu snažnog udara detonacijskih produkata i stvaranja udarnog vala.

Primarni ili inicijalni eksplozivi koriste se za iniciranje detonacije drugih eksploziva i na prvom su mjestu u lancu iniciranja. Oni su iznimno osjetljivi na vanjske impulse, odnosno kod njih je energija potrebna za pokretanje detonacijskog procesa niska. Maksimalna brzina detonacije se razvija u vrlo kratkom vremenu, gotovo trenutno. Primarni eksplozivi se koriste pri proizvodnji različitih vrsta detonatora.

Sekundarni ili brizantni eksplozivi imaju manju osjetljivost na udar i trenje od inicijalnih pa trebaju veću energiju za iniciranje, što je sa stajališta rukovanja eksplozivnih tvari puno sigurnije za rukovanje. Mogu se inicirati u normalnim uvjetima upotrebe isključivo detonacijskim impulsom ili valom. Pri dodiru s plamenom lagano sagorijevaju bez detonacije, a do detonacije se dovode detonacijom inicijalnog eksploziva, odnosno nalaze se u inicirajućem nizu iza inicijalnih eksploziva. Može se reći da inicijalni eksplozivi pokreću detonacijski proces u brizantnim eksplozivima (Dobrilović, 2008).

Brizantnost eksploziva je mjera njihove razorne moći, odnosno oslobođene energije detonacije. Gledano u vremenskom periodu oslobađanja energije, brizantnost je i njihova snaga. U osnovi, i primarni eksplozivi su brizantni, ali njihova se uloga u inicijalnom nizu razlikuje od brizantnih. Može se reći da su u ovom smislu brizantni eksplozivi svi koji se iniciraju inicijalnim eksplozivima i svrha im je davanje korisne energije (Dobrilović, 2008).

2.8. Podjela eksploziva prema sastavu i senzibilizatorima

Prema sastavu i senzibilizatorima eksplozivi se dijele na:

- amonij-nitratni praškasti eksplozivi,
- ANFO eksplozivi,
- plastični,
- vodoplastični ili „*slurry*“ eksplozivi,
- emulzijski i
- želatine.

Amonij-nitratni praškasti eksplozivi proizvode se na osnovi mljevenog amonijeva nitrata i trinitrotoluola kao senzibilizatora. Koriste se za miniranje čvrstih, srednje čvrstih i slabih stijena kao i svih vrsta ugljena. Nisu otporni na vlagu pa se isporučuju u plastičnim omotima. Koriste se kod površinskih miniranja, a dobri rezultati se postižu patronama velikog promjera.

ANFO eksplozivi sastoje se od granuliranog amonijevog nitrata s dodatkom mineralnih ulja. Idealna mješavina eksploziva tipa ANFO je 94,5% amonijeva nitrata i 5,5% goriva, pri čemu se oslobađa energija od 3536 kJ/kg do 3850 kJ/kg eksploziva.

Plastični eksplozivi su velike gustoće i brizantnosti pa su zbog toga i najjači rudarski eksplozivi. Koriste se pri miniranju najčvršćih, čvrstih i žilavih stijena. Osnovni sastojak je želatinizirani amonij-nitrat ili u kombinaciji s drugim nitratima senzibiliziranih nitroderivatima. Plastični eksplozivi sadrže organske i anorganske sastojke koji poboljšavaju detonacijska svojstva ili flegmatiziraju eksploziv te im daju plastičnost podobnu za upotrebu (Dobrilović, 2008).

Vodoplastični eksplozivi sastoje se od vodene otopine nitrata senzibilizirane nitroderivatima uz mogući dodatak metalnog praha za povećanje snage. Nisu osjetljivi na inicijalni impuls rudarske kapice br. 8 pa se detoniraju pomoću jačih detonatora ili određene količine nekog drugog eksploziva. Manje su osjetljivi na udar i trenje pa je rad s njima sigurniji. Služe se miniranje čvrstih, srednje čvrstih i žilavih stijena (Bhandari, 1977).

Emulzijski eksplozivi su vodootporni industrijski eksplozivi proizvedeni emulgiranjem, u kojem su kapljice oksidansa, kao dispergirane faze, suspendirane u kontinuiranoj fazi sastavljenoj od uljnih supstancija, a koje sadrže raspršene staklene mikrokuglice ili neki drugi porozni materijal (Ester, 2005).

Glavna komponentna želatina je želatinizirana smjesa nitroglicerin dinitroglikol sa celulozom. Još sadrži i amonijev, kalijev i natrijev nitrat i male količine organskih i neorganskih tvari.

3. ANFO EKSPLOZIVI

Eksplozivna svojstva amonijeva nitrata prvi put su upotrijebljena 1867. godine, Alfred Nobel, kao zamjena za neke od nitroderivata u dinamitima. Upotreba amonijeva nitrata kao eksplozivnog sastojka je bila u proizvodnji dinamita slijedećih 88 godina. H. B. Lee i R. L. Akre su 1955. godine patentirali upotrebu mineralnog gnojiva, amonijev nitrat s čvrstim ugljičnim gorivom, i uspješno prezentirali njegove osobine kao eksploziva. U početku, goriva su bila kruta, kao što je ugljen, ali kasnije su zamijenjena naftnim gorivom. S time, ANFO je stvoren i prepoznat je ekonomski potencijal amonijeva nitrata u eksplozivnoj industriji. Tijekom 1960-ih ANFO je počeo zamjenjivati ostale vrste eksploziva u suhim bušotinama zbog uštede na troškovima, sigurnijeg rukovanja i bržeg punjenja bušotina te optimalnog odnosa učinka i troškova miniranja (Persson et al, 1994).

ANFO je mješavina 94% do 94,5% granuliranog poroznog amonijeva nitrata i od 5,5% do 6% mineralnog goriva (dizelsko ulje) pri čemu se oslobađa energija od 3536 kJ/kg do 3850 kJ/kg eksploziva (Ester, 2005). Osnova je amonijev nitrat, koji je najčešće granuliran, ali može biti i u prahu, kada se patronira pomiješan s gorivom. Dizel ulje se dodaje amonijevom nitratu da bi se poboljšala eksplozivna svojstva kako bi postao osjetljiviji na početni impuls.

Amonijev nitrat i mineralno gnojivo, u osnovi nisu eksplozivni. Pomiješani u ispravnom omjeru daju učinkovit eksploziv.

U ovisnosti o načinu obrade i kvaliteti sirovine proizvode se dvije vrste eksplozivnih smjesa amonijeva nitrata i dizel ulja. Osjetljivija smjesa u prahu se može inicirati rudarskom kapicom br. 8 ili detonirajućim štapinom. Za iniciranje druge smjese u zrnu potreban je pojačani pentolitski detonator ili patrona nekog drugog osjetljivog eksploziva. Amonijsko-nitratni uljni eksplozivi neotporni su na vlagu te se za punjenje vlažnih bušotina patrone isporučuju u plastičnim omotima. Primjenjuju se najčešće sa snažnim vodoplastičnim ili metaliziranim eksplozivima. Miniranje tim eksplozivima je sigurno i ekonomično jer su jeftiniji od svih ostalih (Krsnik, 1989).

3.1. Amonijev nitrat (AN)

Eksplozivi tipa ANFO proizvode se u dvije izvedbe:

- kao mješavina AN zrnaca (granula) i goriva (plinskog ulja i dr.), a rabe se u rasutom stanju,
- kao mješavina drobljenog AN goriva, mogućnost patroniranja (Ester, 2005).

Svojstva amonijeva nitrata (NH_4NO_3):

Bezbojni kristal

Energija stvaranja	-4413 J/kg
Gustoća	ρ = 1,72 g/cm^3
Brzina detonacije (ovisi o gustoći)	D = 2500 m/s kod ρ = 1,42 g/cm^3
Topljivost u vodi (u g na 100 g tekućine)	66,1 g

Pojavljuje se u pet kristalnih formi koje se transformiraju iz jedne u drugu ovisno o temperaturi:

Tetragonalna $(\alpha)^{-18^\circ}$ ↔ ortorompska $(\beta)^{32,1^\circ C}$ ↔ ortorompska $(\gamma)^{84,2^\circ C}$ ↔ teragonalna $(\delta)^{125,2^\circ C}$ ↔ kubična $(\varepsilon)^{169,6^\circ C}$ ↔ tekuća.

Pri normalnim okolnostima dvije se temperature od navedenih mogu javiti pri rukovanju, a naročito pri skladištenju (-18°C i 32,2°C).

Prilikom oscilacije temperature i prijelaza iz jednog oblika u drugi dolazi do raspadanja kristala u prašinu (AN također), posljedica čega je povećanje gustoće s 0,8 g/m^3 na 1,2 g/m^3. Daljnjim povećanjem gustoće može izostati detonacija.

Amonijev nitrat se izrađuje u dva oblika, kojima se koristi za izradu umjetnih gnojiva i za izradu eksploziva (tablica 3-1.).

Amonijev nitrat za izradu umjetnih gnojiva sadrži vrlo malo vlage (0,3%), odlazi izravno u hladnjak gdje mu se dodaje glina (2,8% - 3,5%). Površina mu je tvrda, ima boju dodane gline i prašinast je (Ester, 2005).

Amonijev nitrat za izradu eksploziva, nakon procesa stvaranja zrnaca iz otopine u bubnju, sadrži oko 4% vlage i odlazi na dvostupanjsko sušenje gdje se, uz lagano hlađenje i isparavanje vlage, stvaraju porozne strukture (upijanje od 6% do 12%) (Ester, 2005).

Tablica 1. Karakteristike AN za gnojivo i AN za eksplozive (Ester, 2005)

Svojstvo	**AN za umjetno gnojivo**	**AN za eksplozive**
Inertna stjenka (glina ili drugi kemijski antikoagulator)	3% - 5%	0,5% - 1%
Tvrdoća	velika	mala
Forma	kristalna	porozna
Distribucija goriva	po površini	kroz granule
Minimalni promjer za detonaciju na otvorenom	228 mm	64 mm
Brzina detonacije u cijevi Ø 100 mm	1,829 m/s	3,353 m/s

Na slici 3-1. Prikazan je amonijev nitrat namijenjen za proizvodnju ANFO eksploziva



Slika 3-1. Amonijev nitrat za proizvodnju ANFO eksploziva (https://medicroslavl.ru/)

3.2. Svojstva ANFO eksploziva

ANFO eksplozive opisuju slijedeća fizikalna, kemijska i detonacijska svojstva.

3.2.1. Gustoća

Gustoća je fizikalno svojstvo same eksplozivne tvari i predstavlja odnos mase eksplozivne tvari i njenog volumena. Smanjenjem gustoće eksplozivne tvari smanjuje se brzina detonacije i tlak detonacijskog udarnog vala. Gustoća komercijalnih eksploziva kreće se u granicama od 0,8 g/cm^3 do 1,6 g/cm^3 (Krsnik, 1989).

Gustoća ANFO eksploziva ovisi o gustoći i veličini AN granula. Većina ANFO eksploziva ima nasipnu gustoću između 0,77 g/cm^3 do 0,88 g/cm^3. Različita su pakiranja ANFO eksploziva, stoga se u nekim pakiranjima pomoću spiralnog dozatora može povećati gustoća ANFO eksploziva uslijed razaranja granula i tlačenja prilikom pakiranja.

S gustoćom iznad 1,2 g/cm^3, osjetljivost na iniciranje i detonacijska svojstva značajno se smanjuju. Pore u eksplozivnim granulama imaju dvostruku ulogu:

- omogućavaju upijanje i zadržavanje naftnog goriva te formiranje homogene smjese,
- imaju djelovanje „vrućih točaka“ ili točaka iniciranja.

3.2.2. Brzina detonacije

Brzina detonacije je jedna od važnijih karakteristika eksploziva, a prema njenom iznosu može se ocijeniti adekvatnost eksploziva za pojedinu upotrebu. O brzini detonacije ovisi razorna snaga, odnosno brizantnost eksploziva. Što je veća brzina detonacije, to je veća oslobođena energija.

Brzina detonacije ANFO eksploziva u rasutom stanju ovisi o promjeru bušotine, gustoći punjenja bušotine te čvrstoći i homogenosti stijene u kojoj se eksploziv nalazi. Brzina detonacije se povećava povećanjem promjera bušotine. U bušotinama promjera 310 mm, brzina detonacije ANFO eksploziva ima iznos od približno 4,75 m/s. U bušotinama ili čeličnim cijevima stabilna detonacija se postiže s promjerima od 25 mm.

Vrsta zatvorenosti koja okružuje ANFO eksploziv utječe na brzinu detonacije i njegovu sposobnost održavanja stabilne detonacije.

3.2.3. Vodootpornost

ANFO eksploziv nije vodootporan. Voda rastapa granule amonijeva nitrata te stoga ANFO gubi svoja eksplozivna svojstva. Time im je uporaba ograničena na suhe minske bušotine. Ukoliko su bušotine vlažne, taj problem se može djelomično riješiti patroniranjem ANFO eksploziva u nepropusne PVC patrone. Međutim, ukoliko su bušotine potpuno zasićene vodom, takav način korištenja ne može se primjenjivati. Budući da je ANFO eksploziv manje gustoće od vode, nema mogućnost da tone u bušotinu te se ne koristi ni u kojem slučaju.

Problem topivosti djelomično se može riješiti i presvlačenjem amonijeva nitrata hidrofobnim materijama (metalnim sapunima, trifenilmetanskim bojama i Na-sol karboksimetilceluloze) (Ester, 2005).

3.2.4. Međudjelovanje s ugljenom i rudama metala

Toplina koja nastaje spontanim egzotermnim kemijskim reakcijama prilikom izloženosti ugljena ili pirita iz metalnih ruda sa zrakom, djeluje na punjenje minske bušotine ANFO eksploziva. Toplina povećava temperaturu i eksploziva i inicijalnih sredstava i stoga može dovesti do topljenja pentolitskog pojačnika (kemijskog razlaganja, odnosno ubrzane oksidacije ANFO eksploziva), a u ekstremnim slučajevima i do neželjenog spontanog iniciranja eksplozivnog punjenja.

Dodavanje kemijskih spojeva koji povećavaju stabilnost amonijeva nitrata pri povišenim temperaturama i pogoduju usporavanju oksidacije dostatno za upotrebu ANFO eksploziva u opisanim specifičnim uvjetima.

3.3. Procesi proizvodnje amonijeva nitrata

Ranije korištena tehnologija proizvodnje amonijeva nitrata naziva se zrnastim procesom. Voda se isparuje iz amonij nitratne otopine na atmosferskom tlaku u zagrijanim spremnicima. Istaljeni amonijev nitrat pluta u prstenastim kotlovima. Veličina i gustoća zrna je kontrolirana veličinom hlađenja i brzinom rotirajućeg bubnja u kotlovima (Atlas Powder Company, 1987).

Drugi, raniji način dobivanja amonijeva nitrata je Stengel-ovim procesom. U tom procesu, dušična kiselina i amonijak reagiraju i tvore koncentriranu taljevinu otopljenog amonijeva nitrata. Koncentrirana taljevina amonijeva nitrata pluta na vodom hlađenoj metalnoj površini te se skrućuje u tankim slojevima. Dobiveni skrućeni slojevi amonijeva nitrata željene debljine oblažu se sredstvima protiv anglomeracije (Atlas Powder Company, 1987).

Današnji najčešći tehnološki postupak proizvodnje amonijeva nitrata je metodom u kugličnom tornju. Proizvodnja AN granula je više stupanjski proces koji počinje s prirodnim plinom i zrakom. Zadnja faza procesa je prolaz koncentrirane AN otopine (od 94% do 96%) kroz perforirane ploče ili glave tuša na vrhu proizvodnog tornja. Tekuće AN kapljice su formirane kako otopina izlazi iz glave tuševa. Tijekom slobodnog pada (od 30,5 m do 61 m), kapljice kristaliziraju u sferične AN granule. Ove granule su osušene, ohlađene i mogu se obložiti sa sredstvima protiv grudanja tijekom transporta (Atlas Powder Company, 1987).

Amonij nitratne granule proizvedene ovim procesom svrstavaju se u dvije kategorije obzirom na gustoću:

- manje gustoće, industrijske namjene i
- veće gustoće, poljoprivredne namjene.

Dvije novosti su se pojavile zadnjih nekoliko godina u proizvodnji AN za izradu gospodarskih eksploziva tipa ANFO:

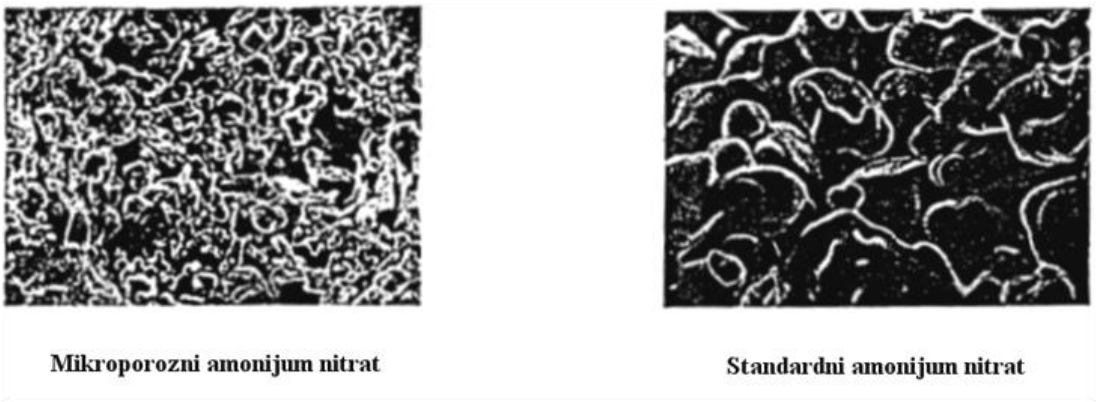
PPM ANFO:

Prilikom proizvodnje zrnaca iz otopine amonijeva nitrata, u bubanj se ubacuju staklene mikrokuglice. One ostaju unutar zrnaca AN. Time se smanjuje gustoća AN otprilike 0,75 g/cm^3 na 0,62 g/cm^3, pojačava se čvrstoća zrnaca, pri čemu se ne smanjuje poroznost, a eksplozivna svojstva su puno bolja nego kod standardnog amonijeva nitrata (Ester, 2005).

MAN – mikroporozni AN:

U procesu proizvodnje amonijeva nitrata (novi postupak) dobivaju se kristali AN deset puta manji od standardnih. Time se povećava površina kontakta tekućina-krutina, povećava se ukupna površina pora uz istodobno smanjenje gustoće (Ester, 2005).

Na slici 3-2. prikazane su strukture standardnog i mikroporoznog amonijeva nitrata.



Slika 3-2. Usporedba struktura standardnog i mikroporoznog amonijeva nitrata (Ester, 2005)

3.3.1. Granule AN za poljoprivrednu namjenu

Prilikom dobivanja granula za poljoprivrednu namjenu, temperatura taljevine koja napušta isparivač je dovoljno velika da osigura vrlo malo vode u granulama AN. Tako se osigurava i veća gustoća i tvrdoća granula. Gustoća ovog proizvoda je obično preko 0,88 g/cm^3. Protok

zraka u tornju se kontrolira, da bi se osiguralo pravilno hlađenje granula. Dok prolaze kroz hladnjak, granule gube dovoljno vlage, te na kraju procesa imaju sadržaj od 0,3% vlage. Amonijev nitrat teži anglomeriranju u veće nakupine, što se događa ako se proces ne vodi ispravno. Glina (od 2,8% do 3,5%) dodaje se zbog usporavanja slijeganja. Poljoprivredna granula je sferična, poprima boju gline i prašnjava je zbog velikog sadržaja gline (Atlas Powder Company, 1987).

3.3.2. Granule AN za industrijsku namjenu

Za granule industrijske namjene potrebne su veće visine tornja zbog većeg udjela vode u taljevini amonijeva nitrata koja prolazi do sapnice prskajućih glava. Dodatna visina omogućava duže vrijeme stvrdnjavanja granula u zračnoj struji. Većina od 4% vlage odstranjuje se iz granula tijekom kontroliranog pada, ostavljajući šupljinu u granulama. Šupljina povećava poroznost granule i sposobnost apsorbiranja naftnog goriva (Atlas Powder Company, 1987).

3.3.2.1. Svojstva granula za industrijsku namjenu

Svojstva granula za industrijsku namjenu su: mali sadržaj gline, mali sadržaj vlage, apsorpcija ulja, niska čestična gustoća, dobra drobljivost i postojanost prema grudanju (Atlas Powder Company, 1987).

Glina ili obložna sredstva nanose se na vanjsku površinu granule u svrhu sprječavanja anglomeracije. Granule za industrijsku namjenu sadrže manje obložnih sredstva jer glina nepovoljno djeluje na eksplozivna svojstva ANFO eksploziva, odnosno inertizira eksploziv. Ostali kemijski proizvodi za sprječavanje anglomeracije djeluju na eksplozivna svojstva u većoj ili manjoj mjeri kao i glina. Upijanje vlage granula s jedne strane omogućava anglomeraciju, a s druge strane vlaga sprječava upijanje mineralnih goriva (Atlas Powder Company, 1987).

Drobivost je svojstvo kojim se može opisati stupanj tvrdoće granule. Kod granula poljoprivredne namjene potrebna je veća tvrdoća, a time i gustoća granula. Kod granula za

korištenje u ANFO eksplozivima, granule moraju biti dovoljno porozne, time i mekane i manje gustoće, kako bi omogućile upijanje mineralnog goriva i postojanje zračnih mjehura unutar granule. S druge strane, tvrdoća i postojanost mora im biti dovoljna za očuvanje konzistencije prilikom korištenja u miniranju (Atlas Powder Company, 1987).

Veličine granula za eksplozive kreću se između 0,5 mm i 1,0 mm promjera. Granule manjih dimenzija daju veću brzinu detonacije, obzirom na veću gustoću tvari, ali im je sklonost grudanju velika (Atlas Powder Company, 1987).

Poroznost granule omogućava upijanje isparavanog udjela mineralnog ulja (naftnog goriva) u srednjem iznosu od 5,5%. Ulje je distribuirano kroz čestice granula, poboljšavajući sposobnost detonacije smjese (Atlas Powder Company, 1987).

3.4. Miješanje ANFO eksploziva

Eksplozivi tipa ANFO jednostavne su mješavine, ali je pri njihovoj proizvodnji važna kvaliteta rabljenog AN (poroznost, granulacija), vrsta goriva i način miješanja AN s gorivom (Ester, 2005).

Sadržaj goriva u smjesi ANFO eksploziva utječe na energiju, brzinu, osjetljivost na iniciranje i na udio plinovitih produkata detonacije.

Ako je sadržaj goriva nepovoljan, dolazi do gubitka ostvarene energije eksploziva tipa ANFO (tablica 3-2.) (Ester, 2005).

Tablica 2. Utjecaj sadržaja goriva na gubitak ostvarene energije eksploziva tipa ANFO (Ester, 2005)

	Sadržaj ulja (%)	**Gubitak energije (%)**	**Učinak miniranja**
Uravnotežena bilanca kisika	5,5	nema	najbolji
Premalo goriva	5,0	5,3	višak kisika
	4,0	12,2	gubitak energije
	3,0	20,0	stvaranje nitroznih plinova
Previše goriva	7,0	1,5	nedovoljno kisika
	8,0	2,9	mali gubitak energije
	9,0	4,9	tamni plinovi

Kemijska reakcija pravilnog omjera pri uravnoteženoj bilanci kisika: *smjesa 94,5% AN i 5,5% mineralnog ulja.* ANFO u pravilnom omjeru ima maksimalnu teoretsku energiju i najveću moguću teoretsku brzinu detonacije.

$$3\ NH_4NO_3 + CH_2 \rightarrow 7\ H_2O + CO_2 + 3\ N_2 + 3{,}88\ \text{kJ/g eksploziva.}$$

Kemijska reakcija pri premaloj količini goriva u smjesi: *smjesa 96,6% AN i 3,4% mineralnog ulja.* Smanjenjem udjela goriva, ANFO mješavina ima višak kisika i tijekom detonacijske kemijske promjene, višak kisika veže se s dušikom i stvara otrovne nitrozne plinove, odnosno okside dušika koji su vidljivi u obliku narančastog dima. Nitrozni plinovi stvaraju se i prilikom reagiranja s kisikom iz vode u mokrim bušotinama jer se na taj način dobiva višak kisika u reakciji.

$$3\ NH_4NO_3 + CH_2 \rightarrow 11\ H_2O + CO_2 + 4\ N_2 + 2\ NO + 2{,}50\ \text{kJ/g eksploziva.}$$

Kemijska reakcija pri prevelikoj količini goriva u smjesi: *smjesa 92,0% AN i 8,0% mineralnog ulja.* Udjelom goriva većim od optimalnog, dolazi do manjka kisika i nepotpune oksidacije te nastaju ugljični plinovi, odnosno povećane količine otrovnog ugljičnog

monoksida. U tom slučaju plinovi nakon miniranja su crne boje zbog nepotpunog izreagiranog organskog dijela goriva.

$$3\ NH_4NO_3 + CH_2 \rightarrow 5\ H_2O + CO + 2\ N_2 + 3{,}38\ kJ/g\ eksploziva,$$

Gdje su:

NH_4NO_3 – amonijev nitrat,

C – ugljik,

H_2 – vodik,

N_2 – dušik,

H_2O – voda,

CO_2 – ugljični dioksid i

e – specifična oslobođena energija (3,88 kJ/kg).

Poznate su i druge mješavine eksploziva tipa ANFO:

$NaNO_3$ (natrijev nitrat)	30%
AN (amonijev nitrat)	50%
Ugljeni prah	10%
Voda	3%
Plinsko ulje	2%

3.5. Iniciranje ANFO eksploziva

ANFO eksplozivi nisu osjetljivi na inicijalni impuls rudarske kapice br. 8. Za iniciranje ANFO eksploziva koriste se pojačnici ili „*boosteri*“ koji osiguravaju vezu u inicirajućem nizu između detonatora ili detonirajućeg štapina i ANFO eksploziva. Pojačnici se izrađuju kao gotovi proizvodi od pentolita, smjese lijevanog pentrita i trotila, ili se koriste patrone eksploziva osjetljivih na inicijalni impuls rudarske kapice br. 8.

Promjer pojačnika nešto je manji od promjera minske bušotine i duljine dovoljne za osiguravanje stabilne detonacije. Brzina detonacije ANFO eksploziva ovisna je o promjeru

minske bušotine i doseže brzine preko 4400 m/s u bušotini promjera 250 mm. Brzina detonacije se smanjuje s promjerom bušotine i smatra se da za promjer manji od 25 mm detonacija nije stabilna. Primjena ANFO eksploziva optimalna je u suhim bušotinama srednjih i velikih promjera (od 75 mm do 250 mm) (Persson et al, 1994).

Pri iniciranju ANFO eksploziva detonirajućim štapinom manje duljinske koncentracije (od 10 g/m do 12 g/m) i pojačnikom, dolazi do destrukcije eksploziva u kontaktu s detonirajućim štapinom prije iniciranja pojačnika. Na taj način, u kontaktu s detonirajućim štapinom, do 30% mase eksploziva u bušotini postaje inertno, čime se gubi i do 30% raspoložive korisne energije. S druge strane, iniciranjem impulsom manje energije od potrebne, dio eksploziva razvija nestabilnu detonaciju, a dio deflagrira čime se gubi dodatni udio energije. Taj utjecaj je izraženiji kod manjih promjera bušotina (do 10 mm), dok je kod većih promjera (250 mm) manje izražen obzirom na manji udio ukupne mase eksploziva u bušotini zahvaćen djelovanjem i destrukcijom detonirajućim štapinom (Persson et al, 1994).

Ispravnim iniciranjem ANFO eksploziva optimiziraju se njegova detonacijska i minerska svojstva, što rezultira pozitivnim ekonomskim efektima.

Iniciranje ANFO eksploziva obavlja se inicijalnim sredstvima koja postižu minimalni tlak detonacije prisutan kod ANFO eksploziva. Iniciranje sredstvima viših detonacijskih tlakova poboljšava detonacijska svojstva eksploziva, brzinu detonacije i oslobođenu energiju ANFO eksploziva.

3.6. Pakiranje i upotreba ANFO eksploziva

ANFO eksplozivi koriste se za miniranje u tri oblika:

- pakirani u vreće, obično mase 25 kg,
- patronirani u PVC patrone i
- pripravljeni na mjestu upotrebe.

ANFO eksploziv pakiran u vreće koristi se za miniranje u suhim bušotinama, direktnim usipavanjem sadržaja vreće u bušotinu. Na taj način, volumna koncentracija punjenja eksploziva u bušotini je potpuna. Vreće su obično višeslojne i zrako tijesne izvedbe što osigurava zaštitu eksploziva od oksidacije i vlaženja u periodu skladištenja. Punjenje iz vreća primjenjuje se kod suhih bušotina. Prilikom punjenja potrebno je pratiti masu utrošenog eksploziva zbog mogućeg gubitka u pukotinama stjenske mase (Atlas Powder Company, 1987).

Na slici 3-3. prikazan je ANFO eksploziv pakiran u vreće.



Slika 3-3. ANFO pakiranja u vreće (https://medicroslavl.ru/)

Patronirani ANFO eksplozivi koriste se u vlažnim bušotinama i u vrlo frakturiranoj stjenskoj masi. Volumna koncentracija punjenja nije potpuna, a prilikom kompakcije i zbijanja punjenja može doći do pucanja obloge patrona i nekontroliranog istjecanja eksploziva u pukotine (Atlas Powder Company, 1987).

ANFO eksploziv, koji se priprema na mjestu upotrebe u mobilnim miješalicama, eksplozivna svojstva dobiva na izlazu iz miješalice. Gotov proizvod se puni u bušotine ili direktno dobavnim cijevima kod kamionskih miješalica ili posredno iz vreća ili posuda kod manjih priključnih miješalica. Prednost priprave na mjestu upotrebe je transport razdvojenih neeksplozivnih komponenti eksploziva te izostanak skladištenja (Atlas Powder Company, 1987).



Slika 3-4. Proizvodnja ANFO eksploziva na mjestu upotrebe (http://dykonblasting.com/portfolio/weeping-water-quarry-quarry-blasting/)

3.7. Klasifikacija i skladištenje

Amonijev nitrat, uključujući i poljoprivrednu i eksplozivnu vrstu, klasificiran je kao oksidirajuća tvar prema propisima U.S. odjela za transport i propise. Prema pravilniku o prijevozu opasnih tvari ADR, važećim u Hrvatskoj, klasificiran je kao opasna oksidirajuća tvar. Ako ne sadrži više od 0,2% ugljika, može se prevoziti u rasutom obliku ili u odobrenim papirnatim vrećama. Svi pojedinačni paketi moraju sadržavati propisane specifikacije. Kada je amonijev nitrat pomiješan s više od 0,2% ugljika, postaje eksplozivna smjesa i skladišti se prema važećim propisima (Atlas Powder Company, 1987).

Naftno gorivo je hlapljivi ugljikovodik koji isparava iz ANFO mješavina tijekom skladištenja. Duljim vremenskim periodom skladištenja u nepropusnim vrećama dolazi do gravitacijskog istjecanja goriva iz granula AN te njegovog koncentriranja na dnu vreće. Na taj način, dolazi do poremećaja masenih omjera te eksploziv gubi prvotna svojstva.

Osjetljivost ANFO eksploziva je najveća kod smjesa s udjelom nafte između 2% do 6%. Izvan tih granica osjetljivost se značajno smanjuje.

Skladištenjem ANFO eksploziva više od tri mjeseca je rizično (Ester, 2005).

3.8. Dodatak aluminija ANFO eksplozivima

Početna ispitivanja upotrebe aluminija u eksplozivima za optimizaciju troškova bušenja i miniranja i poboljšanje fragmentacije su vođena u kasnim 1960-tim godinama u rudnicima željezne rude (Atlas Powder Company, 1987).

Ova optimizacija može dovesti do iznenađujućih rezultata na nekim primjerima upotrebe vodoplastičnih eksploziva sadržaja između 25% i 27% aluminija. Razmak bušotina se povećao, što je rezultiralo s uštedom troškova od 7% do 15% i smanjenju trajanja bušenja za jednu trećinu (Atlas Powder Company, 1987).

Aktualni eksplozivi imaju postotak aluminija između 3% i 5% masenog udjela. Dodatak aluminija se koristi u ANFO eksplozivima u rastresitom i patroniranom obliku, vodoplastičnim eksplozivima i emulzijama. Dodatkom aluminijskog praha povećava se energija detonacije, eksploziv se senzibilizira, a ukupni troškovi miniranja se smanjuju. Kao gorivo, aluminij dodan eksplozivu ili eksplozivnoj tvari povećava ukupnu oslobođenu specifičnu energiju, odnosno povećava korisni rad s jednakim volumenom (masom) eksploziva, dopuštajući povećanje geometrijskih parametara minskog polja. Pri tome se smanjuje udjel mineralnog ulja da bi generalni odnos oksidatora (nositelja kisika) i goriva ostao u optimalnim granicama (Atlas Powder Company, 1987).

Aluminij koji se upotrebljava za dodatak eksplozivima mora imati slijedeća svojstva:

- veličina čestica aluminija mora biti između 0,1 mm i 0,85 mm (veće čestice sporije reagiraju i ne oslobađaju svu raspoloživu energiju, a manje čestice imaju svojstva eksplozivne prašine),
- čistoća aluminija mora biti više od 90% (sadržaj magnezija mora biti manji od 0,5% za vodoplastične eksplozive),
- izostanak čestica veličine prašine zbog nečistoće u aluminiju koja potiču galvanizaciju uzrokujući pH promjene u vodoplastičnim eksplozivima,
- gustoća mora biti postojana.

Aluminij u vodoplastičnim i emulzijskim eksplozivima ima ulogu vrućih točaka dodatnih centara širenja detonacije. Aluminij povećava temperaturu mjehura, odnosno temperaturu iznad uobičajenih vrijednosti za pojedinu eksplozivnu smjesu čime se postiže detonacija pri većim gustoćama eksploziva (Atlas Powder Company, 1987).

Dodatak aluminija amonijevom nitratu povećava izlaznu energiju i poboljšava detonacijske čimbenike: brzinu detonacije, tlak, temperaturu i volumen proizvedenih plinova (Atlas Powder Company, 1987).

4. IZRADA 3D MODELA STRUKTURE ANFO EKSPLOZIVA

Izrada 3D modela strukture ANFO eksploziva rađena je u programu „AutoCad“ te je u nastavku detaljno objašnjen sam postupak izrade.

Prikazana je reakcija pri uravnoteženoj bilanci kisika: *smjesa 94,5% AN i 5,5% mineralnog ulja*:

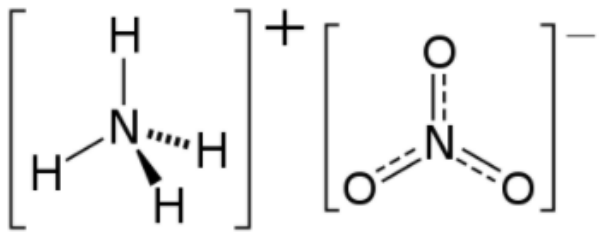
$$3\ NH_4NO_3 + CH_2 \rightarrow 7\ H_2O + CO_2 + 3\ N_2 + 3{,}88\ \text{kJ/g eksploziva}$$

Duljina veze definira se kao udaljenost između središta dvaju kovalentno vezana atoma. Ona se određuje brojem vezanih elektrona (redoslijed veza). Što je redoslijed veza veći, to je jače privlačenje između dva atoma i kraća duljina veze. Općenito je duljina veze između dva atoma približno jednaka zbroju kovalentnih radijusa dvaju atoma. Stoga, duljina veze povećava se slijedećim redoslijedom: trostruka veza < dvostruka veza < jednostruka veza. Duljina veze navodi se u pikometrima.

Način na koji je određena duljina veze: preko nacrtane Lewisove strukture (kako bi se znalo o kojoj vrsti veze se radi), potraži se radijuse za odgovarajuću vezu (LibreTexts) te nađe zbroj dvaju polumjera. Te se odrede odgovarajući polumjeri atoma za svaku molekulu (PubChem).

4.1. Amonijev nitrat, NH_4NO_3

Na slici 4-1. prikazana je strukturna formula amonijeva nitrata.

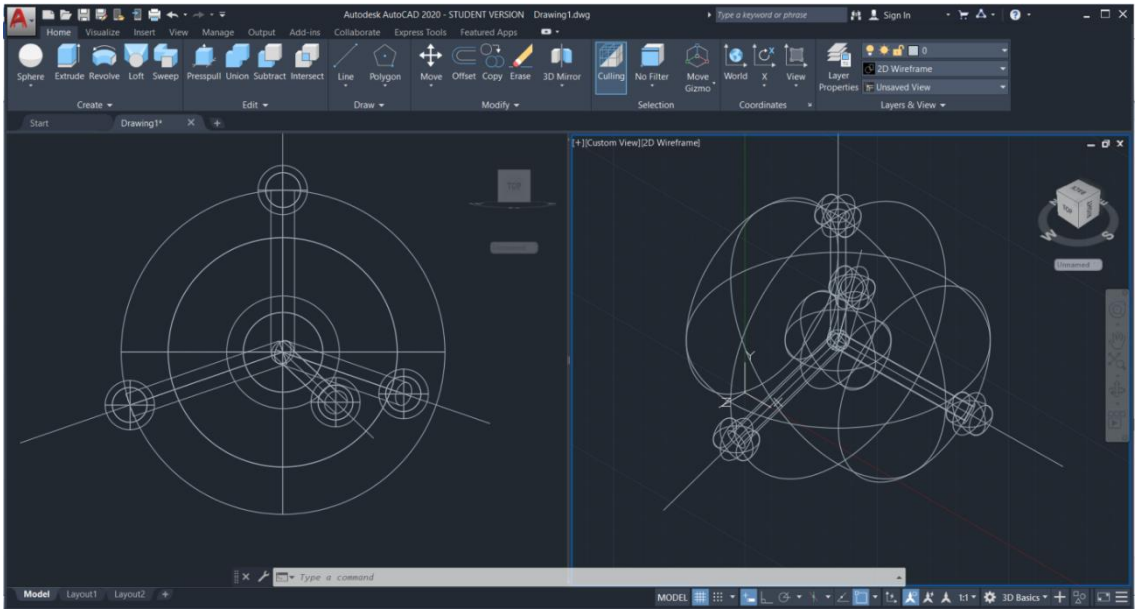


Slika 4-1. Strukturna formula amonijeva nitrata (https://hr.wikipedia.org/wiki/Amonijev_nitrat)

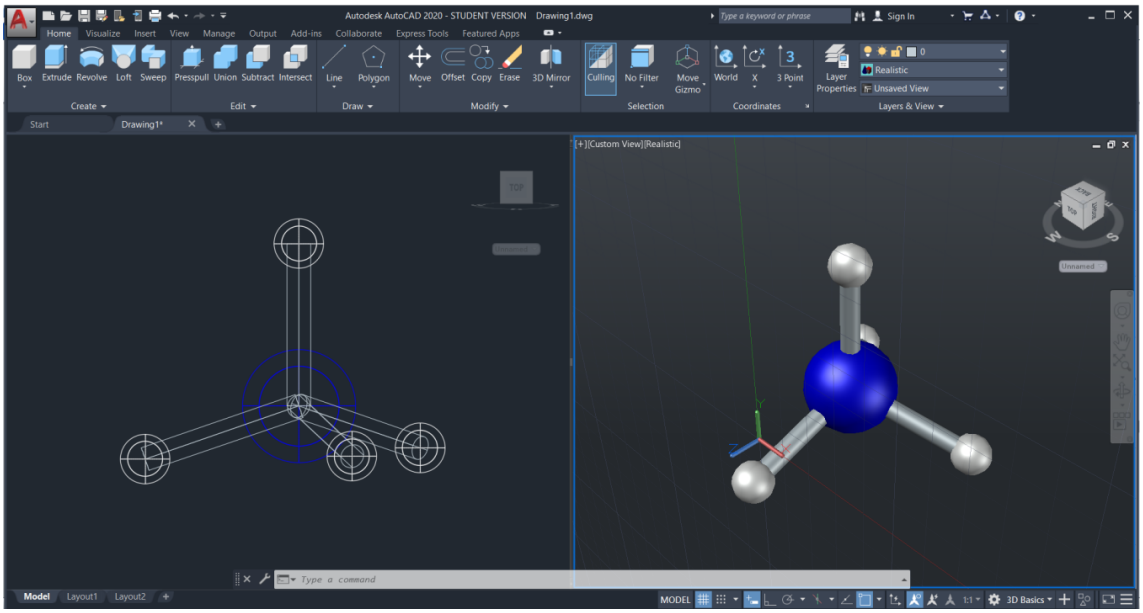
4.1.1. Amonijev ion, NH_4^+

Amonijev ion karakterizira tetraedarska struktura s kutom među vezama od 109,5° (Filipović i Lipanović, 1995). Sadrži jednostruku vezu N-H koja iznosi 102 pm. Do toga podatka dođe se zbrajanjem dvaju kovalentnih polumjera koji iznose: dušik 71 pm te vodik 31 pm.

Na slici 4-2. prikazana je izrada iona, a na slici 4-3. konačni izgled amonijevog iona u programu.



Slika 4-2. Izrada amonijevog iona

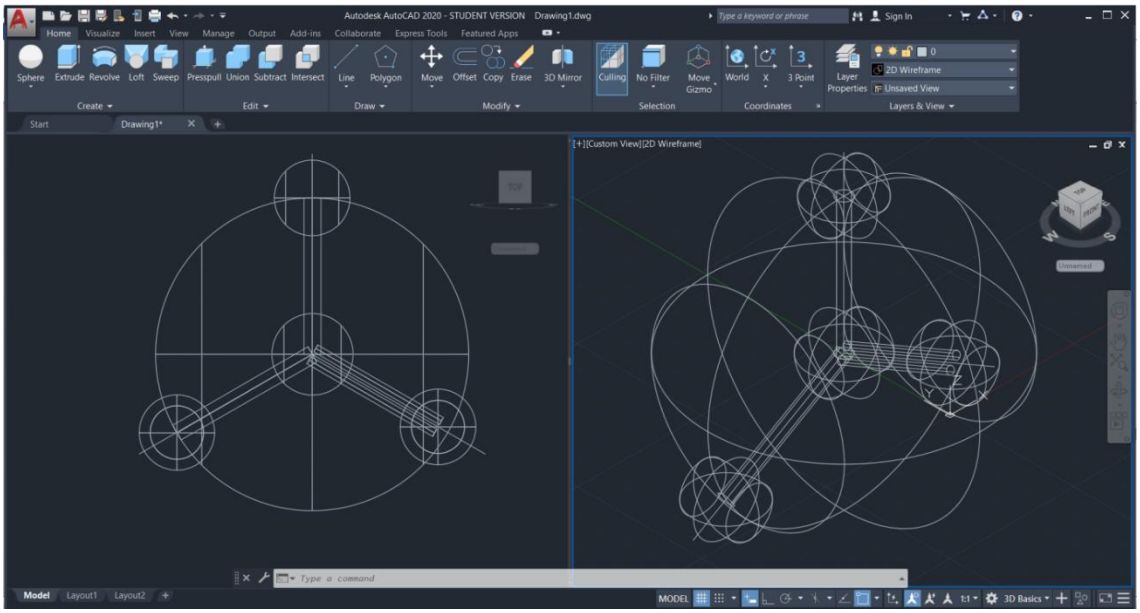


Slika 4-3. Konačni izgled amonijeva iona

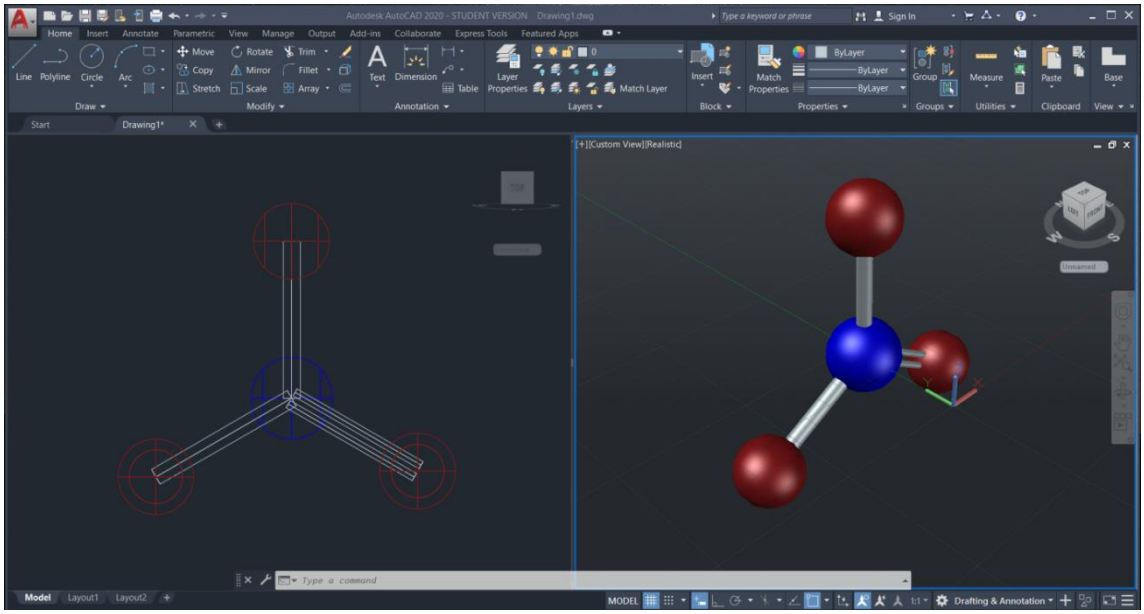
4.1.2. Nitratni ion, NO_3^-

Nitratni ion karakterizira trigonska planarna struktura s kutom među vezama od 120° (Filipović i Lipanović, 1995). Sadrži jednostruku kovalentnu vezu N-O koja iznosi 137 pm. Taj podatak dobijemo zbrajanjem dvaju kovalentnih polumjera koji iznose: dušik 71 pm i kisik 66 pm. Također, prisutna je jedna dvostruka kovalentna veza N=H, s duljinom od 117 pm. Do toga podatka dođemo na isti način, zbrajanjem dvaju kovalentnih polumjera koji iznose: dušik 60 pm i kisik 57 pm.

Na slici 4-4. prikazana je izrada iona, a na slici 4-5. konačni izgled nitratnog iona u programu.



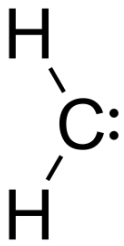
Slika 4-4. Izrada nitratnog iona



Slika 4-5. Konačni izgled nitratnog iona

4.2. Metilen, CH_2

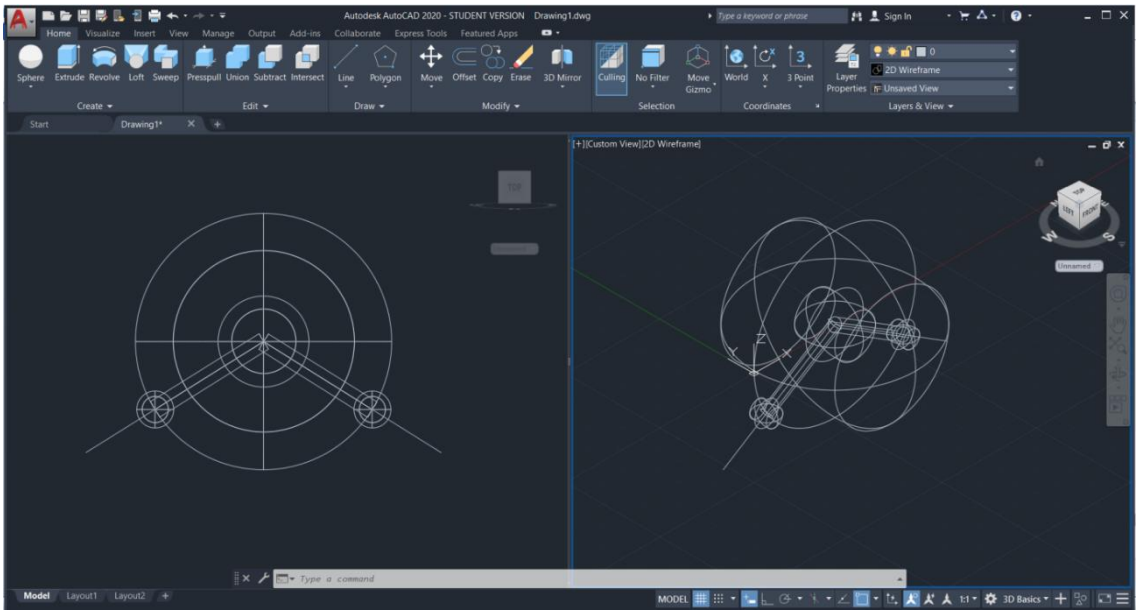
Na slici 4-6. prikazana je strukturna formula metilena.



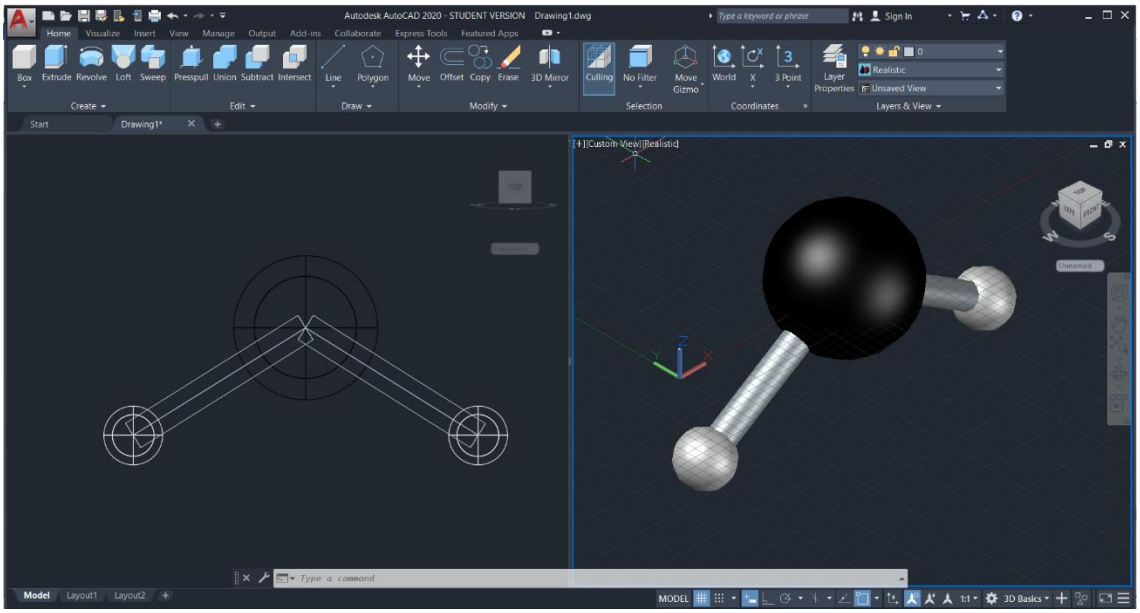
Slika 4-6. Strukturna formula metilena (https://www.wikidata.org/wiki/Q11172462)

Metilen karakterizira savijeni oblik molekule, pod kutom od 116,5°. Gleda se zbroj dvaju kovalentnih polumjera, ugljik 76 pm i vodik 31 pm, kako bi se dobila odgovarajuća duljina jednostruke kovalentne veze C-H, koja iznosi 107 pm. Potrebni polumjeri za prikaz strukture metilena su: vodik 31 pm i ugljik 76 pm (u ovom slučaju gleda se hibridizacija orbitala sp^3 s obzirom da je u pitanju jednostruka kovalentna veza).

Na slici 4-7. prikazana je izrada molekule, a na slici 4-8. konačni izgled molekule metilena u programu.



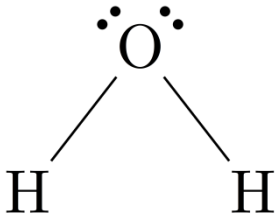
Slika 4-7. Izrada molekule metilena



Slika 4-8. Konačni izgled molekule metilena

4.3. Voda, H_2O

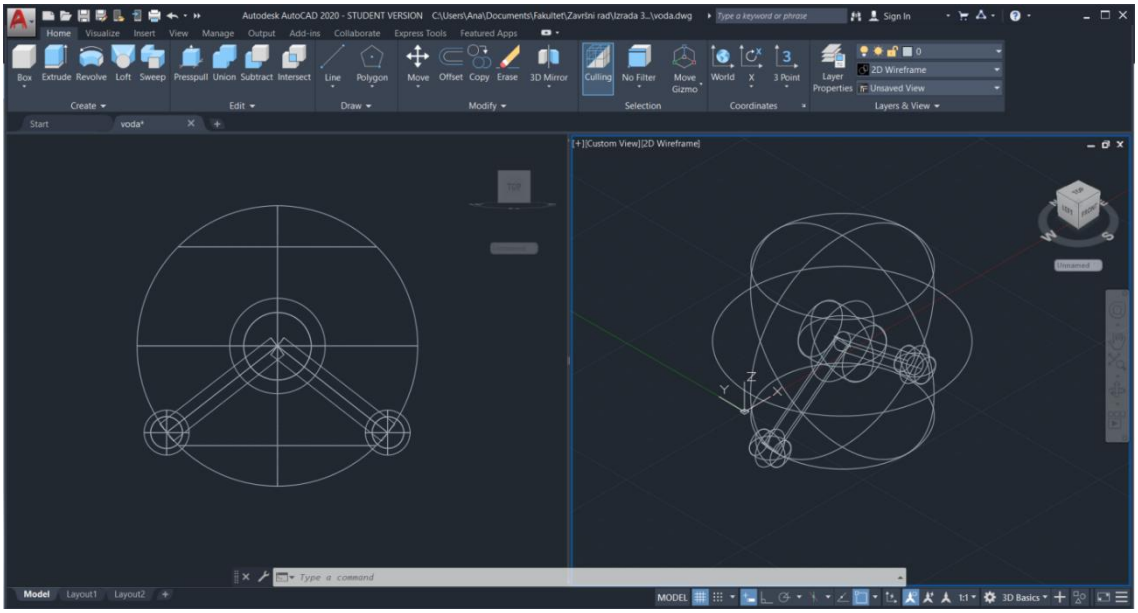
Na slici 4-9. prikazana je strukturna formula vode.



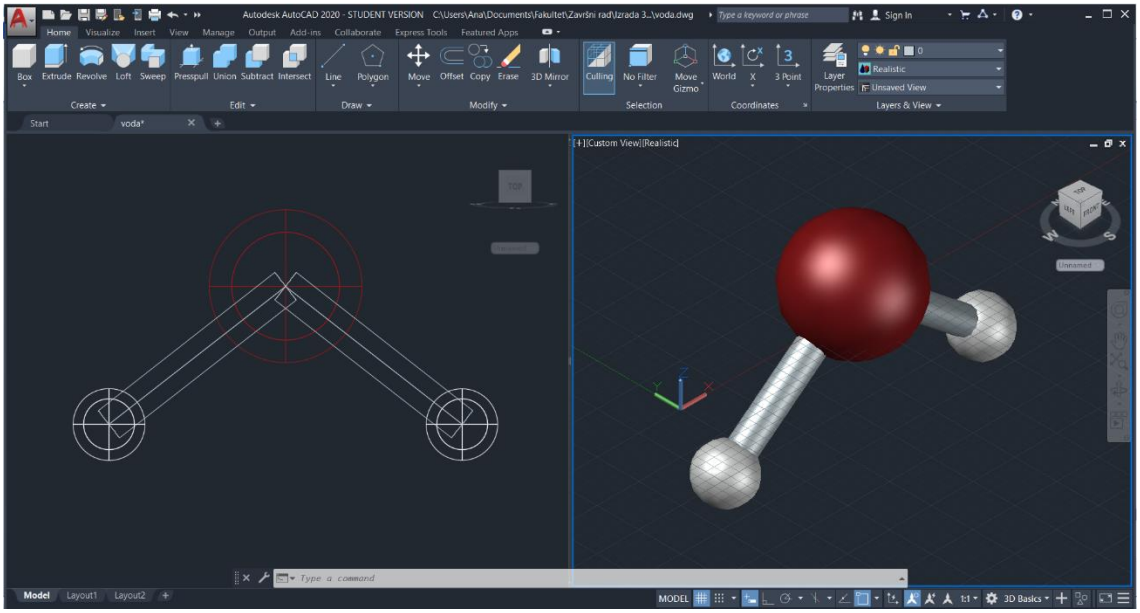
Slika 4-9. Strukturna formula vode (https://socratic.org/questions/what-is-the-molecular-geometry-of-h2o-draw-its-vsepr-and-lewis-structure)

Prostorni raspored atoma u molekuli vode je savijeni (V-oblik) s karakterističnim kutom 104,5°. Sastoji se od jednostruke kovalentne veze O-H koja iznosi 97 pm – zbroj dvaju kovalentnih polumjera koji iznose: kisik 66 pm i vodik 31 pm.

Na slici 4-10. prikazana je izrada molekule, a na slici 4-11. konačni izgled molekule vode u programu.



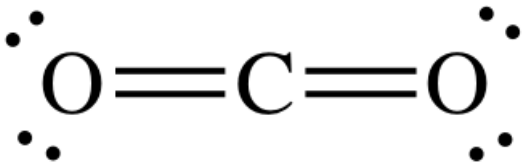
Slika 4-10. Izrada molekule vode



Slika 4-11. Konačni izgled molekule vode

4.4. Ugljikov dioksid, CO_2

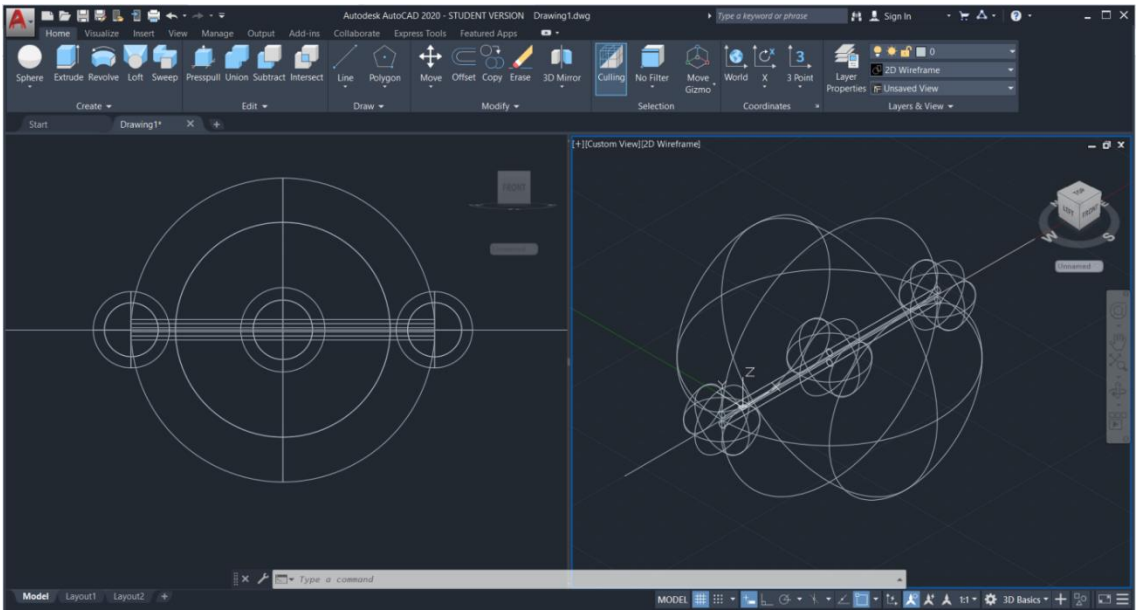
Na slici 4-12. prikazana je strukturna formula ugljikova dioksida.



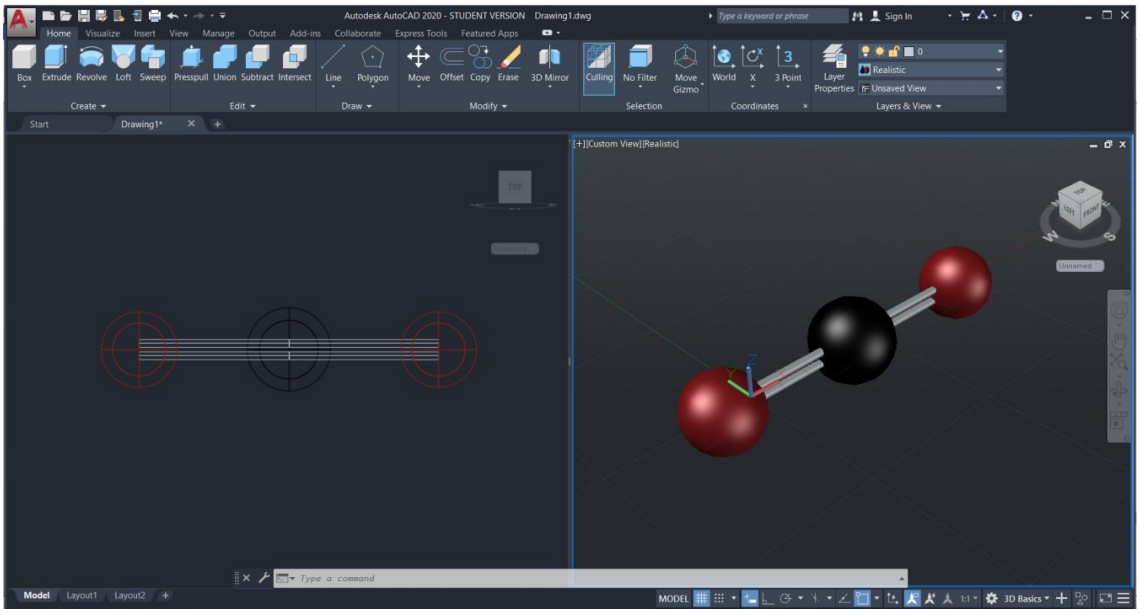
Slika 4-12. Strukturna formula ugljikova dioksida (https://socratic.org/questions/how-can-i-draw-a-lewis-dot-diagram-for-carbon-dioxide)

Ugljikov dioksid ima linearni oblik molekule (kut od 180°). Sadrži dvostruku kovalentnu vezu C=O koja iznosi 124 pm. Do toga podatka dođe se na način da se zbroje kovalentni polumjeri: ugljik 67 pm i kisik 57 pm. Potrebni polumjeri za prikaz strukture iznose: kisik 66 pm i ugljik 73 pm (gleda se hibridizacija orbitale sp^2 zbog dvostruke veze).

Na slici 4-13. prikazana je izrada molekule, a na slici 4-14. konačni izgled molekule ugljikova dioksida u programu.



Slika 4-13. Izrada molekule ugljikova dioksida



Slika 4-14. Konačni izgled molekule ugljikova dioksida

4.5. Dušik, N_2

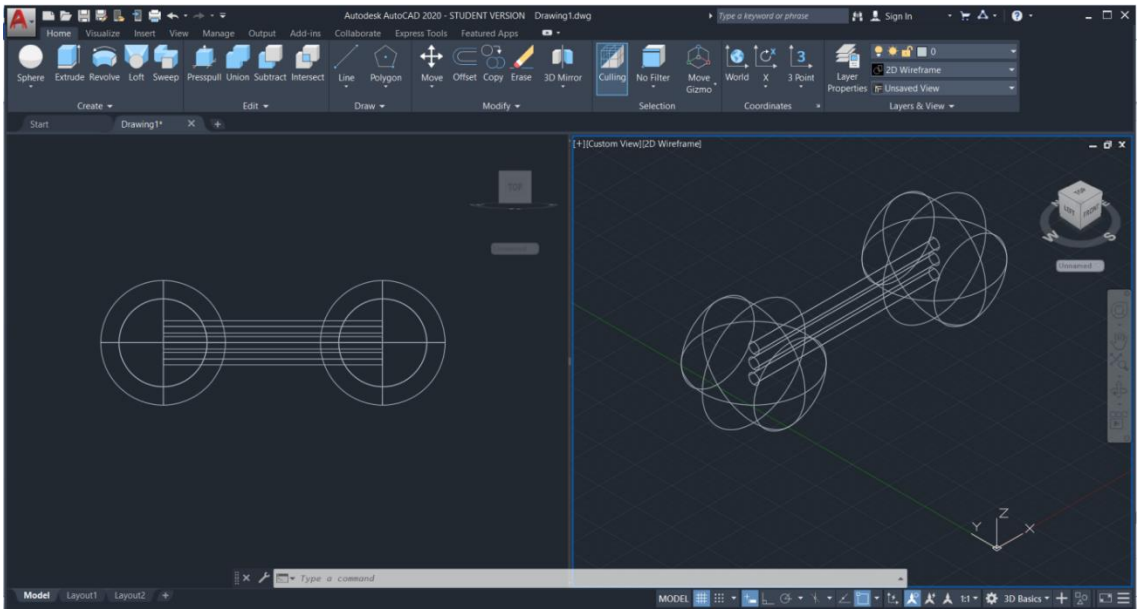
Na slici 4-15. prikazana je strukturna formula dušika.



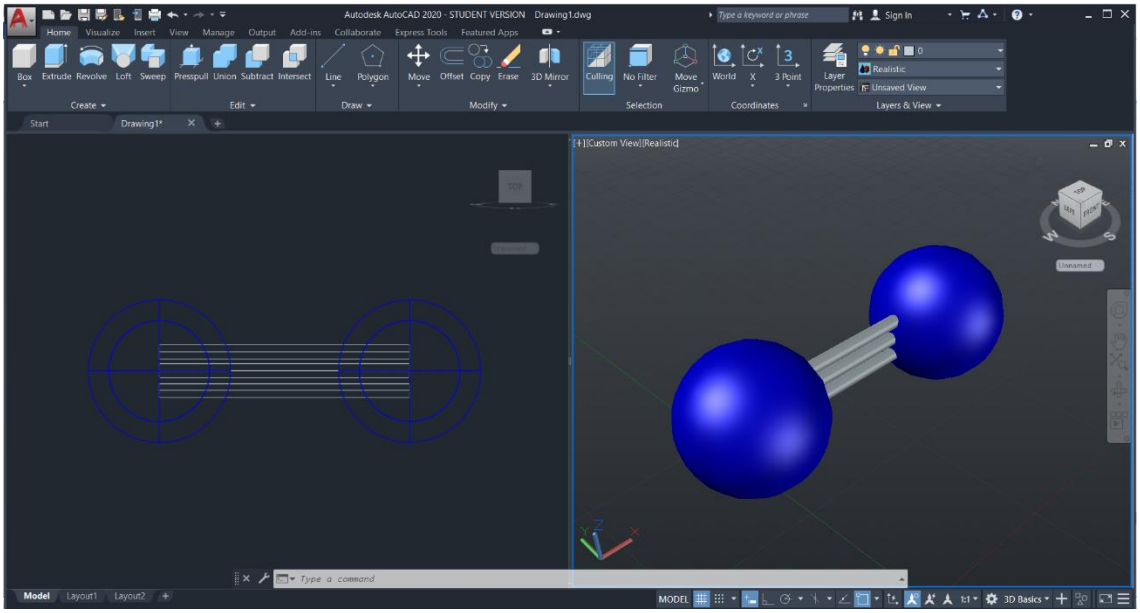
Slika 4-15. Strukturna formula dušika (https://www.omnicalculator.com/chemistry/bond-order)

Dušik ima linearni oblik molekule s kutom od 180°. Karakterizira ga trostruka kovalentna veza koja iznosi 108 pm, na način da se zbroje kovalentni polumjeri, koji za dušik iznosi 54 pm. Potreban polumjer za izradu strukture iznosi 71 pm.

Na slici 4-16. prikazana je izrada molekule, a na slici 4-17. konačni izgled molekule dušika u programu.



Slika 4-16. Izrada molekule dušika



Slika 4-17. Konačni izgled molekule dušika

Nakon izrade 3D modela u AutoCAD-u pristupilo se ispisu modela na 3D printeru CraftBOT XL.

4.6. 3D printer CraftBOT XL

Za ispis 3D modela će se koristiti 3D printer CraftBOT XL. U tablici 3. prikazane su tehničke značajke 3D printera CraftBOT XL.

Tablica 3. Tehničke značajke 3D printera (CraftBot, 2017)

Tehnologija ispisa	Izrada fuziranih filamenata (FFF)
Volumen izgradnje	25 cm × 20 cm ×20 cm
Razlučivost sloja	50 mikrometara (sa 0,25 mm mlaznice)
Preciznost položaja	X, Y: 4 µm Z: 2 µm
Promjer niti	1,75 mm
Promjer mlaznice	0,4 mm
Brzina ispisa	50 mm/s – 200 mm/s

U tablici 4. prikazane su dimenzije printera.

Tablica 4. Dimenzije printera (CraftBot, 2017)

Dimenzije okvira	X: 41 cm Y: 36 cm Z: 38 cm
Sa svim dijelovima	X: 41 cm Y: 46 cm Z: 46 cm
Kutija za otpremu	X: 50 cm Y: 45 cm Z: 48 cm
Masa	14,5 kg
Težina dostave	18,5 kg

U tablici 5. prikazane su temperaturne značajke.

Tablica 5. Temperaturne značajke (CraftBot, 2017)

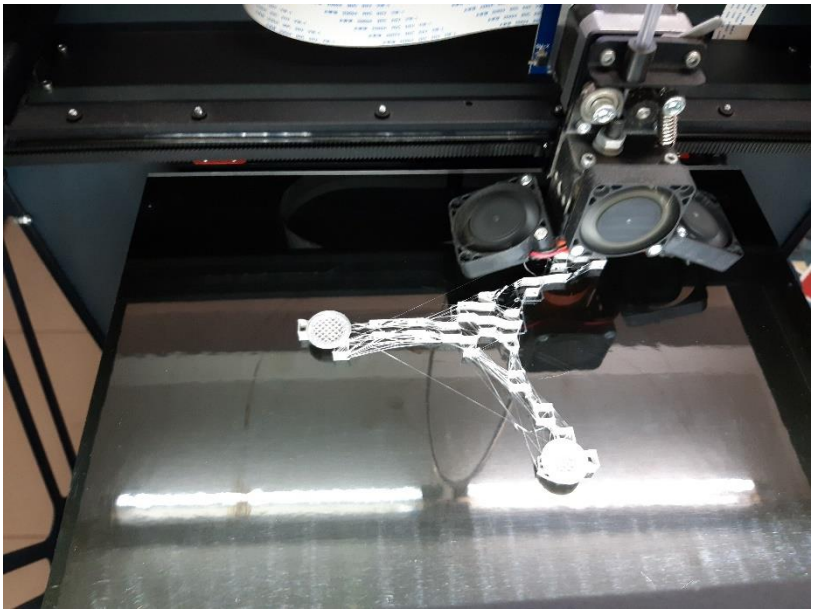
Sobna temperatura	15 °C – 32 °C
Temperatura skladištenja	0 °C – 32 °C
Radna temperatura mlaznice	180 °C – 260 °C
Radna temperatura grijane radne ploče	50°C – 110 °C

U tablici 6. prikazane su značajke programske podrške.

Tablica 6. Značajke programske podrške (CraftBot, 2017)

Programski paket	CraftWare
Vrste datoteke	OBJ/STL/CWPRJ
Podupire	Windows 7 i noviji

Na slici 4-18. je prikazana molekula amonijevog nitrata tijekom 3D ispisa na 3D printeru CraftBOT XL:



Slika 4-188. Molekula amonijevog nitrata tijekom 3D ispisa.

5. ZAKLJUČAK

U završnom radu je prikazana i opisana primjena računalnog programa „AutoCad“ prilikom izrade 3D modela strukture ANFO eksploziva.

3D modelom je prikazana reakcija pri uravnoteženoj bilanci kisika: *smjesa 94,5% AN i 5,5% mineralnog ulja*: $3\ NH_4NO_3 + CH_2 \rightarrow 7\ H_2O + CO_2 + 3\ N_2$ + 3,88 kJ/g eksploziva.

Napravljeni su 3D modeli amonijevog nitrata, amonijevog iona, dušika, metilena, nitratnog iona, ugljikovog dioksida te vode te su ispisani na 3D printeru CraftBOT XL.

Svrha izrade 3D modela strukture ANFO eksploziva je mogućnost korištenja takvih modela u nastavi.

6. LITERATURA

Amonijev nitrat za proizvodnju ANFO eksploziva (slika). Dostupno: https://medicroslavl.ru/ (01.09.2020).

ANFO pakiranja u vreće (slika). Dostupno: https://medicroslavl.ru/ (01.09.2020).

Atlas Powder Company 1987. *Explosives and Rock Blasting*, vol. 1, Dallas: Atlas Powder Company

Bhandari, S. 1997 *Engineering Rock Blasting Operations*, Rotterdam: A. A. Balkema.

CraftBot 2020 *CraftBot* Dostupno: https://support.craftbot.com/hc/en-us/articles/360006870478-Craftbot-Plus-User-Manual (01.09.2020).

Dobrilović, M. 2008. Raspoloživa energija tlačnog udarnog vala udarne cjevčice i njezina primjena u iniciranju električnog detonatora«, doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb.

Ester, Z. 2005. *Miniranje I.: Eksplozivne tvari, svojstva i metode ispitivanja*, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

Filipović, I., Lipanović, S. 1995 *Opća i anorganska kemija, 1. dio*, 9. izdanje, Zagreb: Školska knjiga, str. 225-227.

Hrvatska akademska i istraživačka mreža – CARNET *Kemija 1* Dostupno: https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/e78bfca5-654d-4dcc-b431-7b505feb6fa4/index.html (01.09.2020).

Krsnik, J. (1989.) *Miniranje*, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

LibreTexts, *LibreTexts* Dostupno: https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Ancillary_Materials/Reference/Reference_Tables/Atomic_and_Molecular_Properties/A3%3A_Covalent_Radii(01.09.2020).

National Center for Biotechnology Information, *PubChem.* Dostupno: https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/periodic-table/(01.09.2020).

Persson, P. A., Holmberg, R., Lee, J. 1994. *Rock Blasting and Explosives Engineering*, 1. izdanje, Boca Raton: CRC Press

Proizvodnja ANFO eksploziva na mjestu upotrebe. Dostupno: http://dykonblasting.com/portfolio/weeping-water-quarry-quarry-blasting/(01.09.2020).

Strukturna formula amonijeva nitrata . Dostupno: https://hr.wikipedia.org/wiki/Amonijev_nitrat (01.09.2020).

Strukturna formula dušika (slika). Dostupno: https://www.omnicalculator.com/chemistry/bond-order(01.09.2020).

Strukturna formula metilena (slika). Dostupno: https://www.wikidata.org/wiki/Q11172462(01.09.2020).

Strukturna formula ugljikova dioksida Dostupno: https://socratic.org/questions/how-can-i-draw-a-lewis-dot-diagram-for-carbon-dioxide (01.09.2020).

Strukturna formula vode. Dostupno: https://socratic.org/questions/what-is-the-molecular-geometry-of-h2o-draw-its-vsepr-and-lewis-structure (01.09.2020).