Utjecaj fizikalno-mehaničkih svojstava stijena na učinkovitost udarno-rotacijskog bušenja

Herceg, Vjekoslav

Master's thesis / Diplomski rad

2015

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:169:079620

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
Diplomski studij rudarstva

UTJECAJ FIZIKALNO-MEHANIČKIH KARAKTERISTIKA STIJENA NA UČINKOVITOST UDARNO-ROTACIJSKOG BUŠENJA

Diplomski rad

Vjekoslav Herceg
R 84

Zagreb, 2015.

Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Diplomski rad

UTJECAJ FIZIKALNO-MEHANIČKIH KARAKTERISTIKA STIJENA NA UČINKOVITOST UDARNO-ROTACIJSKOG BUŠENJA

VJEKOSLAV HERCEG

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za rudarstvo i geotehniku
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Sažetak

Na površinskim kopovima „Hruškovec“ i “Straža-Vinceli” obavljena su terenska mjerenja efektivne brzine bušenja minskih bušotina, površinskim bušilicama. Uz mjerenje vremena i dubine prodiranja bušaćeg alata, praćeni su i bilježeni tlakovi hidrauličnog ulja i komprimiranog zraka na stroju za bušenje, kao i izmjena litoloških članova tijekom bušenja. Na eksploatacijskom polju „Hruškovec“ izvedeno je mjerenje tijekom bušenja u dijabazu, bušilicom Atlas Copco ROC F6, koja kao radni alat koristi dubinski bušaći čekić. Mjerenje brzine bušenja u vapnencu izvedeno je na eksploatacijskom polju “Straža-Vinceli”, bušilicom Atlas Copco ROC D7 koja kao radni alat koristi vanjski, hidraulički bušaći čekić. Izmjerene brzine bušenja uspoređene su sa teoretskim izračunima brzine bušenja. Detaljno je opisan razvoj i današnje mogućnosti strojeva koji se najčešće koriste za bušenje minskih bušotina u kamenolomima. Obrađeni su i prikazani rezultati jedne studije koji se temelje na ispitivanju osam različitih vrsta stijena na površinskim kopovima i cestovnim trasama. U rezultatima su prikazane korelacije između brzine bušenja i fizikalno mehaničkih svojstava stijena. Jednoosna tlačna čvrstoća, Schmidtova tvrdoća, vlačna čvrstoća (brazilski test) i čvrstoća kod opterećenja u točki (PLT – test) svojstva su stijena koja su pokazala najveći utjecaj na brzinu prodiranja bušaćeg alata. Utvrđen je također slabiji utjecaj modula elastičnosti i gustoće, dok brzina širenja P-valova nije iskazala nikakav utjecaj na brzinu bušenja.

Ključne riječi: udarno rotacijsko bušenje, fizikalno mehaničke karakteristike stijena, učinkovitost bušenja

Diplomski rad sadrži: 43 stranice, 16 tablica, 26 slika, 14 referenci

Jezik izvornika: hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta
Pierottijeva 6, Zagreb

Voditelj: dr. sc. Trpimir Kujundžić, izvanredni profesor RGNF-a

Ocjenjivači: dr. sc. Trpimir Kujundžić, izvanredni profesor RGNF-a
dr. sc. Mario Dobrilović, izvanredni profesor RGNF-a
dr. sc. Petar Hrženjak, docent RGNF-a

Datum obrane: 17. srpnja 2015.

University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology
and Petroleum Engineering

Master's Thesis

INFLUENCE OF PHYSICO MECHANICAL CHARACTERISTICS OF ROCKS ON EFFICIENCY OF ROTARY PERCUSSION DRILLING

VJEKOSLAV HERCEG

Thesis completed in: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Department of Mining Engineering and Geotechnics
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

The penetration rate measurements with the surface drills were carried out on the open pits „Hruškovec" and „Straža-Vinceli". Beside measuring time and depth of the drilling tool penetration, the drilling machine hydraulic oil and compresed air pressure were monitored and recorded, as well as changes in lithology. On the exploitation field „Hruškovec" the measurements were carried out during the drilling in the diabase with the Atlas Copco ROC F6 drilling machine, which as a working tool uses (DTH) down the hole drilling hammer. Drilling speed measurements in limestone were carried out on the exploitation field „Straža-Vinceli" with the Atlas Copco ROC D7 drilling machine which as a working tool uses top hammer. The measurement results where compared against the theoretical calculations. Furthermore, the detailed development and capabilities of today's drilling machines are described. Also, in this thesis the results of a study which was based on an examination of eight different types of rocks are shown and analyzed. The results have shown the correlation between the penetration rate and the physical mechanical properties of the rocks. Uniaxial compressive strength, Schmidt hardness, tensile strength (Brazilian test) and point load strength showed a strong influence on the rate of penetration of the drilling tool, while lower influence was found between the penetration rate and the modulus of elasticity and the natural density. Influence of the P-wave spreading speed were not found.

Keywords: rotary percussion drilling, physico mechanical characteristics of rock, drilling efficiency

Thesis contains: 43 pages, 16 tables, 26 figures, 14 references

Original in: Croatian

Thesis deposited in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,
Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: PhD Trpimir Kujundžić, Associate Professor

Reviewers: PhD Trpimir Kujundžić, Associate Professor
PhD Mario Dobrilović, Associate Professor
PhD Petar Hrženjak, Assistant Professor

Date of defence: July 17th, 2015

SADRŽAJ

POPIS SLIKA II
POPIS TABLICA IV
POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I ODGOVARAJUĆIH SI JEDINICA V
1. UVOD 1
2. BUŠENJE 2
2.1. Povijesni razvoj bušenja 2
2.3. Vrste bušenja 4
2.3.1. Udarno bušenje 5
2.3.2. Rotacijsko bušenje 5
2.3.3. „Rotary“ (žrvanjsko) bušenje 5
2.3.4. Udarno-rotacijsko bušenje 5
3. BUŠILICE 6
3.1. Opis bušilice 6
3.2. Podjela bušilica 8
3.2.1. Bušilice s vanjskim čekićem („Top hammer“) 9
3.2.2. Bušilice s dubinskim čekićem (DTH) 10
3.2.3. Usporedba bušenja s dubinskim i vanjskim čekićem 13
3.2.4. „Coprod“ sustav bušenja 16
4. SVOJSTVA STIJENA KOJA UTJEČU NA BRZINU BUŠENJA 17
4.1. Obrada rezultata ispitivanja 17
4.2. Rezultat analize 26
5. TERENSKA MJERENJA 27
5.1. Eksploatacijsko polje “Hruškovec” 27
5.2. Eksploatacijsko polje “Straža-Vinceli” 28
5.3. Atlas Copco ROC F6 30
5.4. Atlas Copco ROC D7 32
5.5. Način izvođenja mjerenja 33
5.6. Prikaz rezultata mjerenja 34
5.6.1. Kahramanova relacija za proračun brzine bušenja dubinskog čekića 35
5.6.2. Kahramanov model za proračun brzine bušenja vanjskog čekića 39
6. ZAKLJUČAK 41
7. LITERATURA 42

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Prva parna udarna bušilica (Stack, 1982.) 3
Slika 2-2. Načini mehaničkog razaranja stijenske mase (Kujundžić, 2006.) 4
Slika 3-1. Osnovni dijelovi bušilice 6
Slika 3-2. Shema bušaćih sustava (Atlas Copco, 2010.) 8
Slika 3-3. Princip rada vanjskog čekića (Kahraman, 2003.) 9
Slika 3-4. Principi rada bušilice s dubinskim bušaćim čekićem (Sandvik, 2010.) 12
Slika 3-5. Princip rada dubinskog bušaćeg čekića (Kujundžić, 2006.) 12
Slika 3-6. Zvučna izolacija vanjskog bušaćeg čekića (Atlas Copco, 2010) 14
Slika 3-7. "Coprod" sustav (Atlas Copco 2010) 16
Slika 4-1. Ovisnost brzine prodiranja bušaćeg alata kroz stijenu o jednoosnoj tlačnoj čvrstoći stijene 18
Slika 4-2. Ovisnost brzine prodiranja bušaćeg alata kroz stijenu o Schmidtovoj tvrdoći stijene 19
Slika 4-3. Ovisnost brzine prodiranja bušaćeg alata kroz stijenu o vlačnoj čvrstoći stijene 20
Slika 4-4. Ovisnost brzine prodiranja bušaćeg alata kroz stijenu o indeksu čvrstoće stijene kod naprezanja u točki 21
Slika 4-5. Ovisnost brzine prodiranja bušaćeg alata kroz stijenu o čvrstoći stijene na udar 22
Slika 4-6. Ovisnost brzine prodiranja bušaćeg alata kroz stijenu o modulu elastičnosti stijene 23
Slika 4-7. Ovisnost brzine prodiranja bušaćeg alata kroz stijenu o gustoći stijene 24
Slika 4-8. Ovisnost brzine prodiranja bušaćeg alata kroz stijenu o brzini širenja P-valova 25
Slika 5-1. Zemljopisni položaj eksploatacijskog polja "Hruškovec" (Google Maps, 2015) 27
Slika 5-2. Kamenolom dijabaza 28
Slika 5-3. Geografski položaj kamenoloma "Straža-Vinceli" (Google Maps, 2015) 28
Slika 5-4. Mjesto mjerenja 29

Slika 5-5. Atlas Copco ROC F6 30
Slika 5-6. Unutrašnjost kabine bušilice 31
Slika 5-7. Bušilica Atlas Copco ROC D7 32
Slika 5-8. Hidraulični bušaći čekić 32
Slika 5-9. Ovisnost Schmidtove tvrdoće o jednoosnoj tlačnoj čvrstoći 37

POPIS TABLICA

Tablica 4-1. Prikaz rezultata ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće i brzine prodiranja.....18
Tablica 4-2. Prikaz rezultata Schmidtove tvrdoće i brzine prodiranja 19
Tablica 4-3. Prikaz rezultata ispitivanja vlačne čvrstoće i brzine prodiranja 20
Tablica 4-4. Prikaz rezultata čvrstoće kod naprezanja u točki i brzine prodiranja.....21
Tablica 4-5. Prikaz rezultata čvrstoće na udar i brzine prodiranja 22
Tablica 4-6. Prikaz rezultata modula elastičnosti i brzine prodiranja 23
Tablica 4-7. Prikaz rezultata gustoće i brzine prodiranja 24
Tablica 4-8. Prikaz rezultata brzine širenja P-valova i brzine prodiranja 25
Tablica 5-1. Tehničke karakteristike bušilice.....30
Tablica 5-2. Podatci o čekiću 31
Tablica 5-3.Tehničke karakteristike stroja 33
Tablica 5-4. Podatci o čekiću 33
Tablica 5-5. Rezultati mjerenja na eksploatacijskom polju “Hruškovec” 34
Tablica 5-6. Usporedba bušaćih parametara primjenjivih u Kahramanovom modelu i karakteristika bušilice Atlas Copco ROC F6.....35
Tablica 5-7. Rezultati mjerenja na eksploatacijskom polju “Straža-Vinceli” 38
Tablica 5-8. Usporedba bušaćih parametra primjenjivih u Kahramanovom modelu i bušilice Atlas Copco ROC D7.....39

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I ODGOVARAJUĆIH SI JEDINICA

Simbol	**Značenje**	**Jedinica**
PR	brzina bušenja	m/min
P	tlak komprimiranog zraka	bar
d	promjer bušaće šipke	mm
R_n	Schmidtova tvrdoća (N tip).	-
UCS	Jednoosna tlačna čvrstoća	MPa
σ_c	jednoosna tlačna čvrstoća	MPa
b_{pm}	frekvencija udara	min^{-1}
q	udio kvarca	%

1. UVOD

Bušenje minskih bušotina i miniranje u današnje je vrijeme najčešća tehnologija dobivanja čvrstih mineralnih sirovina. Bušenje u cilju izvođenja miniranja temelji se na principu mehaničkog razaranja stijene. Osnovne funkcije bušenja su frakturiranje i usitnjavanje stijenske mase na dnu bušotine te iznošenje nabušenih čestica s dna bušotine na površinu. Brzina bušenja stijene ovisi o nizu parametara od kojih neke možemo, a neke ne možemo kontrolirati. Parametre koje možemo kontrolirati su vrsta i promjer bušaće krune, brzina rotacije, radni pritisci, frekvencija i način iznošenja odlomljenih fragmenata, dok su geološke prilike u ležištu van kontrole (Kahraman, 1999.). Zbog toga je, u cilju što točnijeg proračunavanja brzine bušenja, neophodno dobro poznavanje stijenske mase te utjecaj njenih karakteristika na bušenje. U literaturi je moguće pronaći čitav niz analiza na temu brzine bušenja. Autori analiza žele pronaći poveznicu između brzine bušenja i nekog od fizikalno-mehaničkih svojstava stijene.

U sklopu ovog rada izvedena su dva terenska mjerenja brzine bušenja minskih bušotina. Jedno je mjerenje izvedeno tijekom bušenja bušilice s vanjskim čekićem u vapnencu, dok je drugo izvedeno tijekom bušenja bušilice s dubinskim čekićem u dijabazu. U ovom će radu biti prikazani rezultati terenskih mjerenja uspoređeni s teoretskim izračunima brzine bušenja. Također će biti prikazani utjecaji nekih fizičko-mehaničkih karakteristika stijena na brzinu bušenja.

Zadatak ovog rada je na temelju svih prikazanih rezultata zaključiti na koji način i u kojoj mjeri fizikalno-mehaničke karakteristike stijena utječu na učinkovitost udarno-rotacijskog bušenja.

2. BUŠENJE

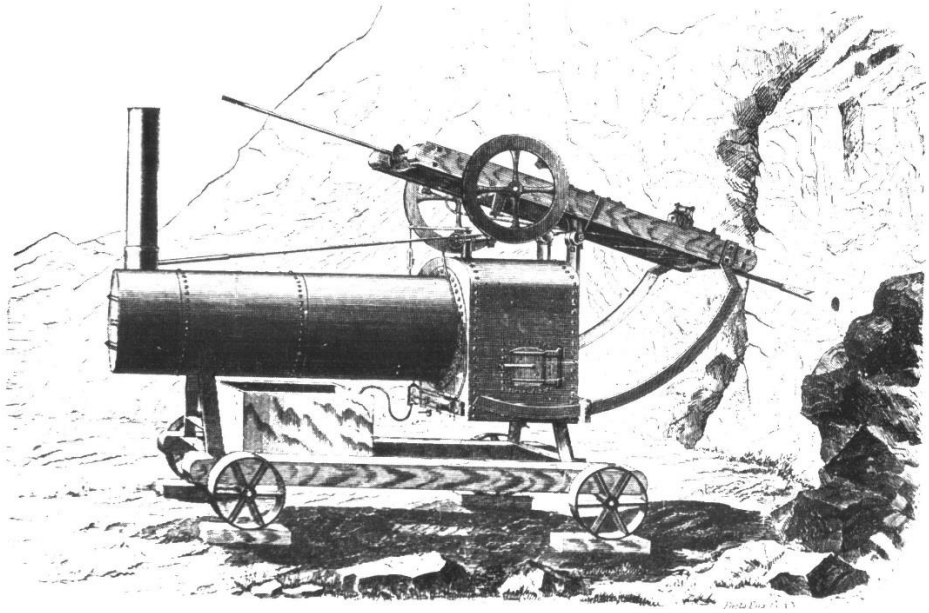
2.1. Povijesni razvoj bušenja

Bušenje minskih bušotina započinje u 17. stoljeću početkom korištenja eksploziva u rudarstvu. U početku se izvodilo ručno i to najčešće na tri načina:

1. **Rotacijsko bušenje** - okretanjem spiralnog svrdla uz istodobno potiskivanje svrdla prema dnu bušotine. Taj se način bušenja primjenjivao u mekim stijenama i ugljenu.
2. **Udarno bušenje** - udaranjem čekića po jednom kraju dlijeta dok je drugo stalno prislonjeno uz stijenu te zaokretanje nakon svakog udarca. Taj se način bušenja koristio u tvrdim stijenama.
3. **Udarno bušenje (sa zamahom)** – dizanjem dlijeta rukama s dna bušotine, jakim zamahom ponovo spuštanje na dno bušotine te zaokretanje dlijeta za određeni kut nakon svakog spuštanja. Taj se način bušenja koristio u srednje tvrdim i tvrdim stijenama.

Kod rotacijskog bušenja iznošenje nabušenih čestica omogućavalo je spiralno svrdlo, dok se kod udarnog bušenja za to koristio poseban alat "žlica". Kod udarnog načina bušenja dlijeto se okretalo kako bi sječivo svakim udarcem odsjeklo novi komad stijene na dnu bušotine. Učinak ručnog rotacijskog bušenja bio je od 3 do 6 m/h u mokrom ugljenu do čak 1,2 m/h u žilavom lignitu. Kod udarnog bušenja sa zamahom učinak je bio oko 1,2 m/h u srednje tvrdim stijenama, dok se u tvrdim stijenama udarnim bušenjem mogao postići učinak od 0,6 m/h (Kralj,1982.).

To je bio vrlo mukotrpan i dugotrajan posao. Iz tog su se razloga pojavile prve bušilice za bušenje u stijeni. Kao pogonsku energiju u početku su koristile ljudski rad, sve do razvoja parnog stroja, te komprimiranog zraka kao pogonske energije. Velika revolucija u bušenju minskih bušotina bila je pojava ručnog bušaćeg čekića, koji je znatno ubrzao izradu minskih bušotina. Razvojem bušaćeg čekića razvile su se bušilice koje su bile pogonjene komprimiranim zrakom. Naknadno, primjenom i ostalih pogonskih energija u rudarstvu (hidraulična energija, električna energija, energija motora s unutarnjim izgaranjem) u tom se smjeru razvijaju i bušilice. U Americi je 1849. godine prvi put upotrijebljena vodena para kao pogonska energija za bušenje, dok se komprimirani zrak kao pogonska energija za bušenje prvi put spominje 1850. godine. Bušilice pogonjene vodenom parom, a kasnije i komprimiranim zrakom radile su na udarnom principu.



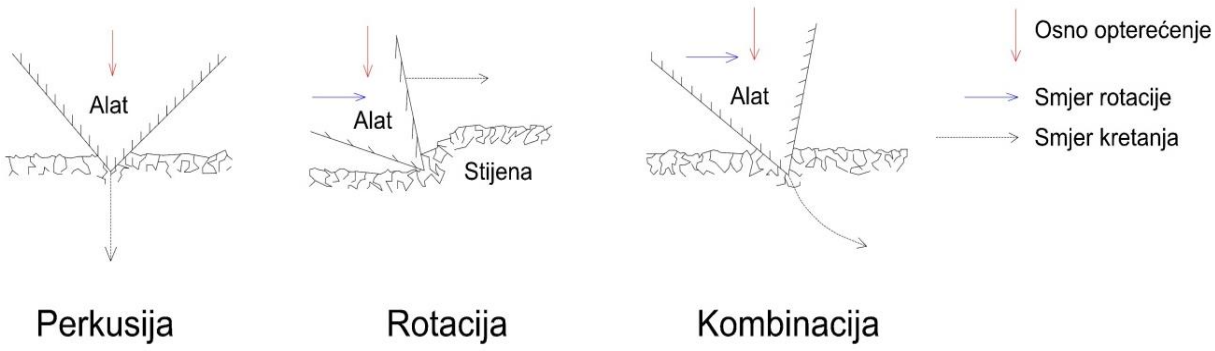
Slika 2-1. Prva parna udarna bušilica (Stack, 1982.)

Tako je 1849. godine Couch patentirao prvu udarnu bušilicu (slika 1-1.) Kod tih je strojeva zahtijevana udarna energija bila relativno mala iz razloga što su se koristili za bušenje bušotina relativno malog promjera u odnosu na dubinu.

A. Von Brandt iz Ebenseea u Austriji izumio je prvu isključivo hidraulički pogonjenu bušilicu patentiranu u Americi 1878., a njen je razvoj započeo 1876. u Njemačkoj. Ta se bušilica prvi put koristila pri proboju tunela Pfaffensprung na trasi željezničke pruge Gotthard. Nakon toga počela se primjenjivati u mnogim rudnicima u Austriji i Njemačkoj. Između ostalih i u Labinskom ugljenokopu u Istri gdje se pokazala vrlo uspješnom pa je istisnula iz upotrebe do tada korištenu Darlingtonovu udarnu bušilicu pogonjenu komprimiranim zrakom (Stack, 1982.). U periodu od 1870 – tih do ranih 1950 – tih godina gotovo da i nije bilo nikakvog daljnjeg razvoja hidrauličnih bušilica. Novi, revolucionarni koncept udarnog bušenja nazvan "bušenje s dubinskim čekićem" (DTH – "down – the – hole drilling") pojavljuje se 1962. godine. Izumio ga je Andre Stenuick iz Belgije. Posebnost kod DTH metode bila je to što je čekić pogonjen komprimiranim zrakom bio smješten u bušotini neposredno iznad bušaće krune. Nabušene čestice iz bušotine iznosile su se strujom istrošenog zraka kojim se pogonio čekić. U razdoblju od 1950. do 1960. godine pojavljuju se rudarski strojevi pogonjeni hidraulikom, te se tako razvijaju i hidraulične bušilice što je dovelo do pojave hidrauličnih motora za rotaciju bušaćeg dlijeta, no udarni je mehanizam i dalje ostao pogonjen komprimiranim zrakom. Prve potpuno hidrauličke udarno-rotacijske bušilice s bušaćim čekićem na površini pojavljuju se tek 1970-tih godina (Kujundžić, 2002.).

2.2. Današnje spoznaje o bušenju

Osnovne funkcije bušenja, kao procesa mehaničkog razaranja stijene, su frakturiranje i usitnjavanje stijenske mase na dnu bušotine te njihovo iznošenje na površinu. Frakturiranje stijene događa se uslijed interakcije između bušaćeg alata i stijenske mase na dnu bušotine uvjetovane djelovanjem sila većih od čvrstoće stijenske mase. Osnovni načini mehaničkog djelovanja bušaćeg alata na stijenu su perkusija, rotacija te njihova kombinacija (slika 2-2.).



Slika 2-2. Načini mehaničkog razaranja stijenske mase (Kujundžić, 2006.)

Bušivost stijene definira se kao otpor koji se javlja pri prodiranju bušaćeg alata i on nije ekvivalentan nijednoj poznatoj vrsti čvrstoće. Polje naprezanja proizvedeno bušaćim alatom mora biti tako orijentirano da proizvede prodiranje u stijensku masu u željenom obliku i veličini bušotine. Ta su naprezanja u stvari kvazi-statička jer se sile u procesu bušenja nanose relativno sporo. Maurer je 1962. godine demonstrirao da su sila inercije, inducirani val naprezanja i efekti brzine nanošenja naprezanja prilikom bušenja gotovo zanemarivi (Kujundžić, 2006; Atlas Copco, 2006.).

2.3. Vrste bušenja

Osnovna podjela bušenja prema načinu razaranja stijenske mase:

a) udarno
b) rotacijsko
c) „rotary“ (žrvanjsko)
d) udarno-rotacijsko bušenje.

2.3.1. Udarno bušenje

Način mehaničkog razaranja stijene isključivo djelovanjem udarne sile. Kod udarnog bušenja radni je alat u obliku dlijeta ili u obliku bušaće "krune" s umetcima od tvrdog metala u obliku gumbi ("buttons"). Radni alat se rotira tako da bušaća ″kruna″ udari svaki put u drugu točku te dolazi do sekvencijalnog formiranja udubljenja odnosno rupe (bušotine) u stijeni koja dalje usmjeruje bušaći alat. Pritom se između svakog pojedinog udarca pojavljuje i rotacijski moment koji je vrlo malog intenziteta i nije zaslužan za prodiranje radnog alata u stijenu. Pritiskanje radnog alata na dno bušotine kod ovog načina bušenja ima isključivo funkciju održavanja kontakta radnog alata s dnom bušotine (Kujundžić, 2006.).

2.3.2. Rotacijsko bušenje

Zarezivanje stijene ostvaruje se pomoću dvije sile, potiska i rotacijskog momenta, odnosno tangencijalne komponente sile rotacijskog momenta koja djeluje na površinu stijene. Potisak i rotacija ostvaruju se preko bušaćih šipki (Kujundžić, 2006.).

2.3.3. „Rotary" (žrvanjsko) bušenje

U principu se kod "Rotary" odnosno žrvanjskog bušenja može koristiti isti tip bušilice (misli se na cijeli stroj) kao i kod rotacijskog bušenja, ali kod žrvanjskog bušenja se koristi se veća sila potiska i rotacijskog momenta pa su u skladu s tim i veće i snažnije bušilice. Bez obzira što se pojavljuju iste sile kao i kod rotacijskog bušenja, mehanizam razrušavanja stijene je drugačiji jer je radni alat drugačije izveden (Kujundžić, 2006.).

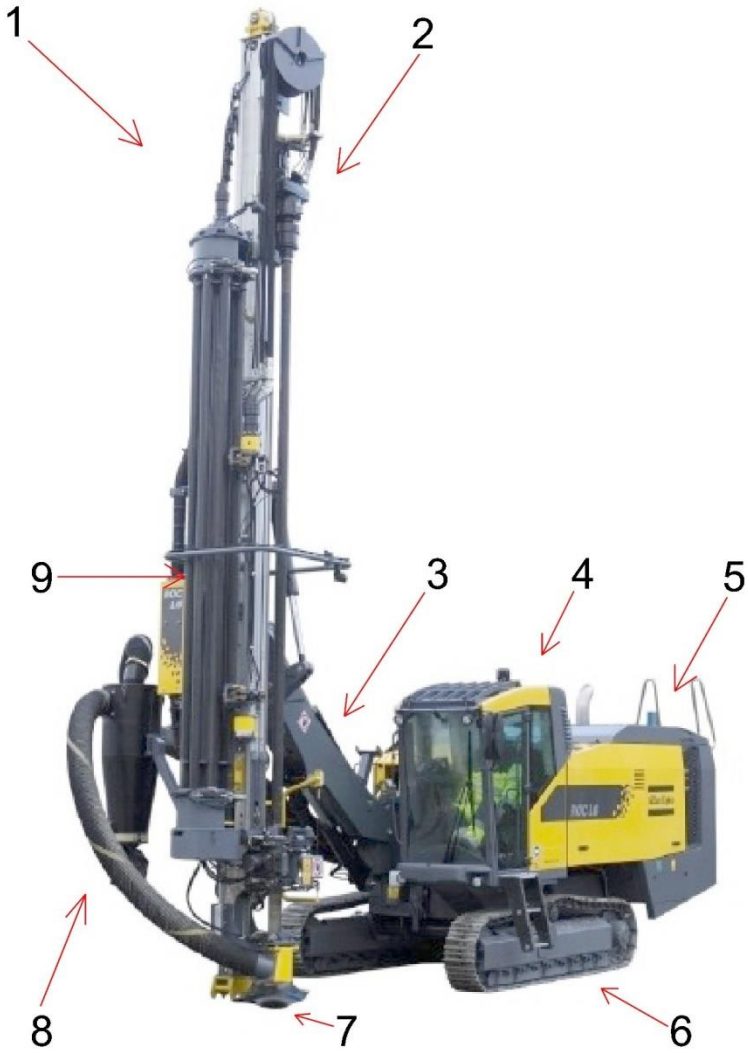
2.3.4. Udarno-rotacijsko bušenje

Kod udarno-rotacijskog bušenja glavni mehanizam razrušavanja stijene je udar, ali je rotacijski moment veći nego kod samo udarnog bušenja, pa se javlja i posmično razrušavanje. Ovakav način frakturiranja stijene ostvaruje se stalnim potiskivanjem bušaće krune na dno bušotine te istovremenom konstantnom rotacijom bušaćeg pribora. Rotacija se postiže motorom za rotaciju koji je potpuno odvojen od udarnog mehanizma. Ovo je metoda koja se danas najviše koristi (Kujundžić, 2006.).

3. Bušilice

3.1. Opis bušilice

Na slici 3-1. prikazana je moderna bušilica za bušenje minskih bušotina. Ona se u osnovi sastoji od lafete (1), čekića (2), „ruke“ (3) i podvozja (5), jednako kao što su imale i prve bušilice prije više od 150 godina.



Legenda

1. Vodilica (lafeta)
2. Čekić
3. „Ruka“
4. Kabina
5. Podvozje
6. Gusjenice
7. Kruna
8. Sustav za otprašivanje
9. Spremnik bušaćih šipki

Slika 3-1. Osnovni dijelovi bušilice (Atlas Copco, 2010.)

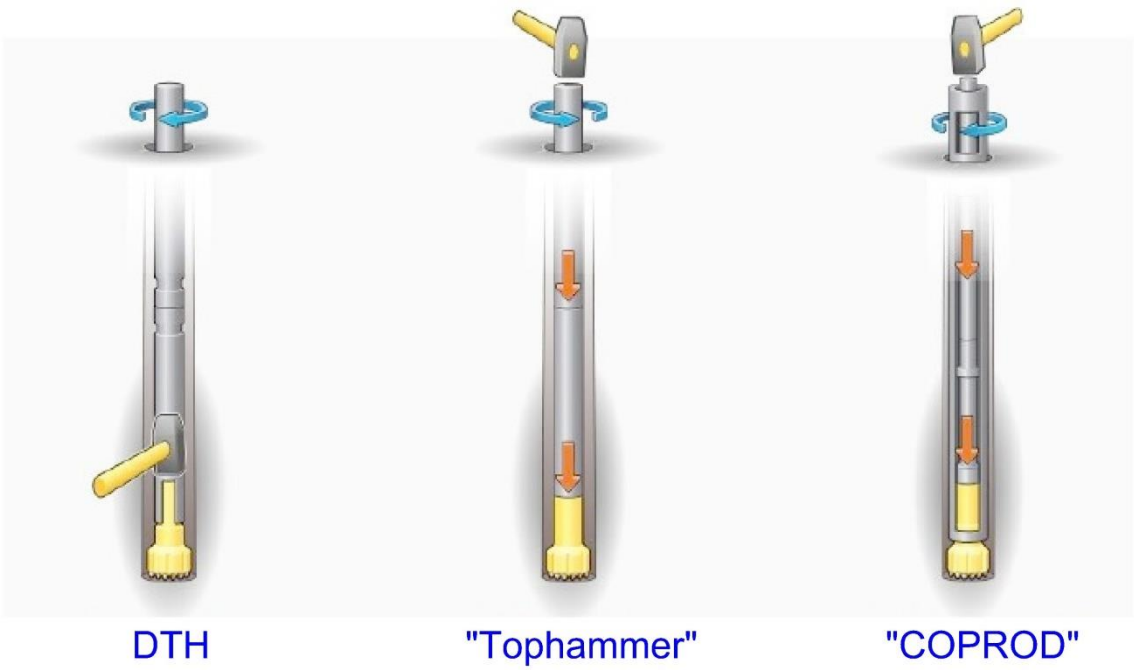
Kao što vidimo na slici 3-1., današnje bušilice opremljene su također i različitom opremom koja pojednostavljuje rad i povećava kvalitetu izrade bušotina. Na podvozju (5) imaju smješten dizel agregat koji pogoni hidraulične pumpe, kompresor, usisavač te električni agregat, također smještene na podvozju. Hidraulične pumpe energijom ulja pod tlakom pogone ostale hidraulične uređaje (čekić, hidraulične agregate, cilindre) koji imaju različite funkcije tijekom bušenja. Kompresor ima funkciju komprimiranja zraka koji se koristi za iznošenje nabušenih čestica s dna bušotine na površinu, te kao pogonska energija kod DTH čekića. Usisavač je dio sustava za otprašivanje (8), a ima funkciju podtlakom djelovati na zračnu struju, odnosno usisavati zrak kroz sustav cijevi, aerociklona i filtara u svrhu skupljanja prašine sa ušća bušotine. Električni agregat proizvodi električnu energiju potrebnu za rad svih električnih i elektronskih uređaja (reflektori, senzori, komande za upravljanje i dr.). Na podvozju je najčešće smještena i kabina (4), mjesto s kojeg se upravlja strojem (Atlas Copco, 2010.).

Ovakvi strojevi obično rade na vrlo nepristupačnim terenima, pa kao sustav za kretanje najčešće koriste gusjenice (6). „Ruka“ ili „grana“ (3) sustav je čeličnih nosača i cilindara s funkcijom pozicioniranja lafete. Vodilica ili lafeta (1) radni je dio stroja koji ima funkciju usmjeravanja, vođenja i potiskivanja bušaćih cijevi u bušotinu. Na njemu se nalazi bušaći čekić, ukoliko je bušilica izvedena sa vanjskim čekićem (2), koji se kreće po vodilicama duž lafete, preko njega se osigurava potisak te proizvodi udarce i rotaciju. Ako je bušilica izvedbe DTH, umjesto čekića nalazi se rotacijski motor. Moderne bušilice na lafeti također imaju i set bušaćih cijevi koje se nalaze u spremniku (9) te se automatski mogu izmjenjivati.

3.2. Podjela bušilica

Danas u rudarstvu postoje velike potrebe za različitim, specifičnim strojevima, što je u kombinaciji sa današnjim tehnološkim dostignućima razlog postojanju vrlo velikog broja različitih tipova strojeva za bušenje, zasnovanih na različitim principima rada. Prema tome postoje i mnoge podjele strojeva za bušenje. U ovom će se radu koristiti podjela (slika 3-2.) na temelju principa rada modernih udarno-rotacijskih bušilica:

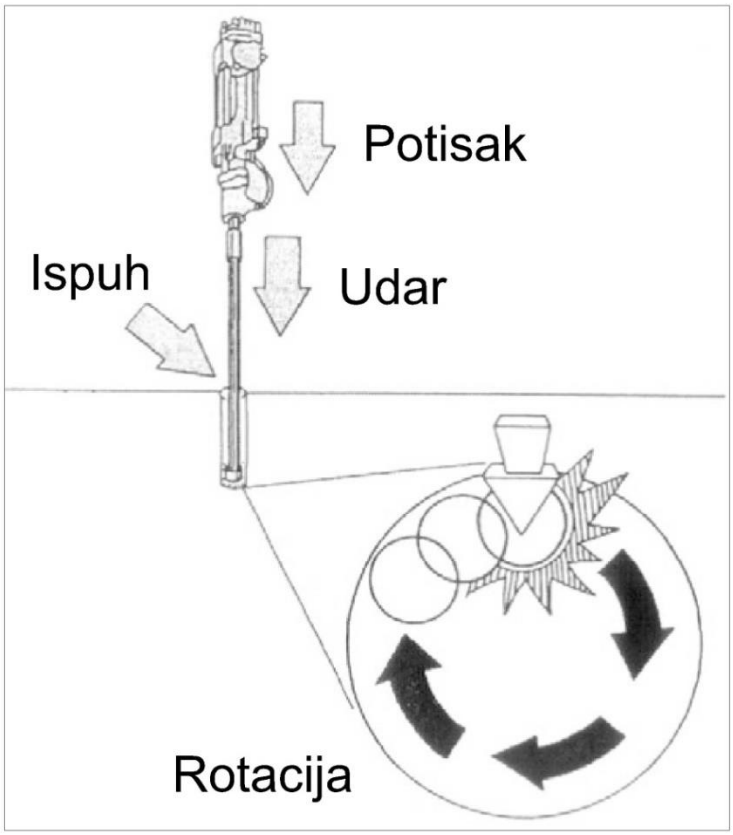
1. Bušilice s čekićem na površini *(„Top hammer“)*
   - hidraulične bušilice
   - pneumatske bušilice
2. Bušilice s čekićem u bušotini *(„Down the hole“* – DTH*)*
   - pneumatski motor za rotaciju i pneumatski čekić
   - hidraulični motor za rotaciju i pneumatski čekić
3. *„Coprod“* sustav bušenja



Slika 3-2. Shema bušaćih sustava (Atlas Copco, 2010.)

3.2.1. Bušilice s vanjskim čekićem *(„Top hammer“)*

Proces bušenja kod bušilica s čekićem na površini odvija se na način da čekić, koji je smješten na vodilici, pogonjen komprimiranim zrakom ili hidrauličkim uljem generira udar i rotaciju (slika 3-3.). Udarni impuls postiže se ubrzavanjem klipa u bušaćem čekiću koji udara na usadnik bušaće šipke. Niz bušaćih šipki ili cijevi prenosi udarnu energiju brzinom od približno 5000 m/s sve do bušaće krune, koja preko umetaka od vrlo tvrde legure razrušava stijensku masu na dnu bušotine. Sva se energija ne utroši na destrukciju stijene, već se jedan dio reflektira u obliku povratnog vala. Bušaće šipke ili cijevi također prenose i rotaciju kojom rotira usadnik na čekiću. Potisak na bušaću krunu osigurava vodilica na način da sustavom čeličnih užadi, lanaca ili hidraulički vuče ili gura čekić na koji je prikopčan niz bušaćih cijevi i to u smjeru bušenja. Dakle, kod ovih se izvedbi bušilica sve tri potrebne komponente za razrušavanje stijene (perkusija, rotacija i potisak) generiraju na površini. Iznošenje nabušenih čestica stijene iz bušotine odvija se pomoću komprimiranog zraka.



Slika 3-3. Princip rada vanjskog čekića (Kahraman, 2003.)

Pet je glavnih čimbenika koji utječu na brzinu bušenja kod bušilica s vanjskim čekićem (Kujundžić, 2006.):

- energija pojedinog udarca
- frekvencija udaraca
- rotacija
- sila potiskivanja bušaće krune na dno bušotine
- iznošenje nabušenih čestica

Ovakve su bušilice s čekićem na površini pogodne za korištenje u srednje tvrdim do tvrdim stijenama i to za bušotine do 230 mm promjera i do dubine od 20 m. Dimenzije, snaga i masa čekića određuju i dimenzije, snagu i masu cijelog stroja. S povećanjem dimenzija čekića sve više do izražaja dolazi učinkovitost konstrukcije cijele bušilice pa njezina mobilnost, upravljivost i jednostavnost rukovanja igraju važnu ulogu u cjelokupnom procesu bušenja.

3.2.2. Bušilice s dubinskim čekićem (DTH)

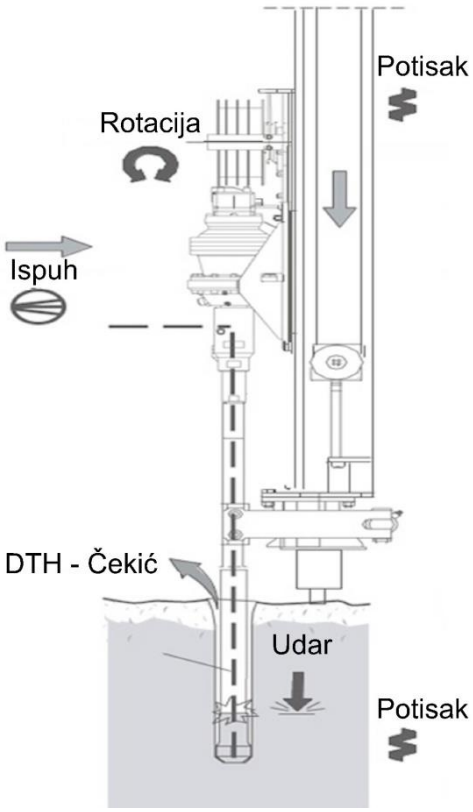
Kod bušilica s dubinskim čekićem (*eng. down the hole),* kao što i sam naziv govori, čekić se nalazi u bušotini na kraju bušaćih cijevi. Kruna kojom se razrušava stijena na dnu bušotine usađena je izravno na čekić. Udar, koji generira čekić ubrzavanjem klipa pod djelovanjem komprimiranog zraka, predaje se izravno na krunu. Na taj se način ne gubi energija udara kroz bušaće cijevi ili šipke. Dodatna ušteda energije postiže se korištenjem istrošenog zraka, koji izlazi iz čekića, za iznošenje nabušenih čestica iz bušotine. Rotacija se postiže na površini preko rotacijskog motora pogonjenog hidrauličnim uljem ili komprimiranim zrakom. Rotacijski motor smješten je na vodilici, na njega se nastavlja niz bušaćih cijevi te se kliznim pomicanjem po vodilici osigurava i potrebni potisak na bušaći alat. Bušilice s dubinskim čekićem primjenjuju se za bušenje bušotina u različitim vrstama stijena i pridruženih materijala i to za razne namjene bušotina. Današnji moderni čekići su robusne konstrukcije, što im omogućava da koriste tlak zraka i do 28 bara. Brzina bušenja s dubinskim čekićem direktno je proporcionalna tlaku komprimiranog zraka, pa se danas proizvođači trude da se omogući što veći tlak kako bi se shodno tome dobila i veća brzina bušenja (Kujundžić, 2006; Atlas Copco, 2006.).

Bušenje s dubinskim bušaćim čekićem temelji se na djelovanju triju već spomenutih sila. Njihovo je djelovanje shematski prikazano na slici 3-4. (Sandvik, 2010.):

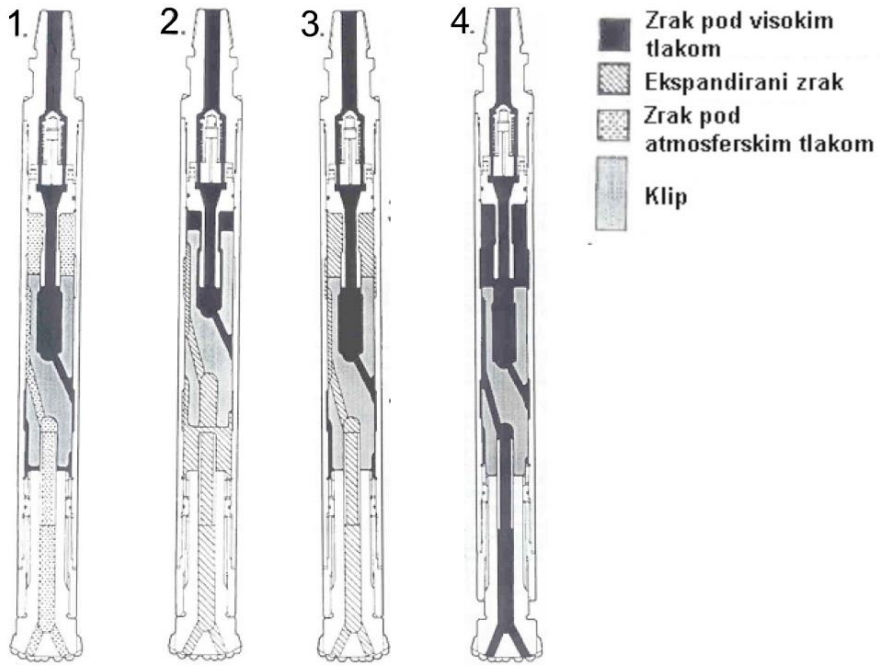
Sila udara (engl. *Percussion*) ovisi o udarnoj sili i frekvenciji udara, a osigurava prodiranje bušaće krune u stijenu. Tijekom prijenosa udara s klipa bušaćeg čekića na bušaću krunu, oslobađa se zrak koji služi za čišćenje (ispuhivanje) odlomljenih fragmenata stijena s dna bušotine (engl. *Flushing*). Snaga udara izravno je proporcionalna pritisku zraka, pa se njime i kontrolira. Kod mekših stijena pritisak zraka trebao bi biti manji, ali dovoljan da nakon obavljanja rada u čekiću učinkovito izvrši ispuh odlomljenih fragmenata stijene s dna bušotine. Neučinkovito čišćenje bušotine rezultira smanjenjem brzine bušenja, smanjuje životni vijek bušaćih šipki, povećava trošenje bušaćeg čekića i povećava mogućnost zaglave bušaće opreme.

Sila potiskivanja bušaćeg pribora na dno bušotine (engl. *Feed*) ima funkciju održavanja neprestanog kontakta bušaće krune sa stijenom na dnu bušotine (slika 3-4.). Intenzitet sile potiskivanja bušaćeg pribora ovisi o pritisku komprimiranog zraka kojim se kontrolira sila udara, vrsti stijene u kojoj se buši, dužini bušotine te vrsti i karakteristikama bušaće opreme. Ukoliko pretjerano povećamo silu potiskivanja bušaćeg pribora na dno bušotine, neće doći do povećanja brzine bušenja, već dolazi do povećanog trošenja bušaćeg čekića, devijacije bušotine i iskrivljenja bušaćih šipki. Premala sila potiskivanja ne omogućava prijenos energije udara s bušaćeg pribora na stijenu, što uzrokuje oštećenja na bušaćim cijevima i bušaćem čekiću. Moderne bušilice posjeduju automatsko namještanje optimalne sile potiskivanja, dok je kod bušenja sa starijim strojevima vrlo bitno iskustvo osobe koja upravlja bušilicom.

Sila rotacije (engl. *Rotation*) postiže okretanje bušaće krune tako da se svaki udar izvrši na novoj poziciji. Optimalna brzina rotacije ovisi o tipu, geometriji i veličini bušaće krune te fizikalno - mehaničkim karakteristikama stijene. Veća brzina rotacije od optimalne uzrokuje povećano trošenje bušaće krune jer do odlamanja stijene dolazi uslijed rotacije, a ne uslijed sile udara. Manja brzina rotacije od optimalne uzrokovat će manju brzinu bušenja i pretjerano usitnjavanje odlomljenih stijenskih fragmenata.



Slika 3-4. Principi rada bušilice s dubinskim bušaćim čekićem (Sandvik, 2010.)



Slika 3-5. Princip rada dubinskog bušaćeg čekića (Kujundžić, 2006.)

Na slici 3-5. shematski je prikazan princip rada dubinskog čekića u četiri stupnja:

1. Klip se nalazi u donjem položaju prislonjen na bušaću krunu, dok je čekić pritisnut na dno bušotine, zrak pod visokim pritiskom dolazi s donje strane klipa i podiže klip.
2. Kako klip pod djelovanjem komprimiranog zraka putuje prema gore, tako svojim tijelom prekriva gornji ispušni otvor. Daljnjim napredovanjem klip prekriva otvor za dovod komprimiranog zraka s donje strane klipa i otkriva otvor kroz koji zrak pod tlakom s donje strane klipa ekspandira kroz krunu na dno bušotine. U isto vrijeme zrak pod tlakom biva usmjeren s gornje strane klipa te potiskuje klip prema dolje, čime započinje udarno gibanje klipa, a završava udarom klipa na bušaću krunu.
3. Za vrijeme udarnog gibanja klip prekriva otvor kroz koji zrak s donje strane klipa ekspandira na dno bušotine. Nakon što je udario u bušaću krunu, daljnjim napredovanjem klip otvara otvor kroz koji se zrak pod tlakom usmjerava s donje strane klipa te tako počinje novi ciklus.
4. Podizanjem čekića s dna bušotine, bušaća kruna pada na osiguravajuće prstenove, a klip se spušta u donji položaj unutar cilindra. Zrak pod tlakom sada nesmetano prostrujava kroz čekić i bušaću krunu na dno bušotine. Čekić se sada nalazi u položaju maksimalnog ispuhivanja bušotine. Za nastavak bušenja potrebno je ponovo pritisnuti tj. spustiti čekić na dno bušotine, čime se bušenje automatski nastavlja.

3.2.3. Usporedba bušenja s dubinskim i vanjskim čekićem

Kad uspoređujemo sustave bušenja s dubinskim i vanjskim bušaćim čekićem, svaki od njih ima svojih prednosti i nedostataka pri bušenju u određenim uvjetima. Ti su uvjeti: vrsta stijene, potrebni kapacitet, željena dimenzija rupe, željena kvaliteta rupe, raspoloživo vrijeme, dozvoljena buka, klimatski uvjeti, ekonomski uvjeti i ostalo. Ovi se uvjeti također uzimaju u obzir kod izbora najpogodnijeg stroja za obavljanje nekog posla. Budući da se ove dvije vrste strojeva u današnje vrijeme najviše primjenjuju za bušenje minskih bušotina, njihova je usporedba vrlo česta tema.

Mehanički, osim što se razlikuju po smještaju i izvedbi čekića, svi su ostali sustavi (hidraulika, pneumatika, elektronika…) prilagođeni čekiću te se manje ili više razlikuju. Na primjer, kod bušilica s čekićem na površini koji je pogonjen hidrauličkim uljem, što je najčešći primjer, ključnu ulogu uz hidraulični čekić predstavlja hidraulična pumpa. Kod ovakvih tipova bušilica snaga hidraulične pumpe izravno ovisi o kapacitetu, odnosno brzini bušenja te je kod konstruiranja stroja prioritetna snaga hidrauličke pumpe. Kod bušilica s dubinskim čekićem snaga hidrauličke pumpe ne predstavlja veliku ulogu u brzini bušenja jer pokreće neke manje bitne procese, već je naglasak stavljen na snagu kompresora koji komprimira zrak za pogon čekića. Sama konstrukcijska izvedba bušilice s dubinskim i vanjskim čekićem nema nužne značajne razlike.

Bušenje vanjskim čekićem odlikuje se većom brzinom prodiranja, no na uštrb toga, bušotine su slabije kvalitete, odnosno velika je mogućnost inklinacije bušotine te nestabilnosti stijenki bušotine. Inklinacija, odnosno skretanje pravca bušotine, događa se najviše zbog nehomogenosti stijenske mase. Bušaća kruna pod djelovanjem udarne sile prije razori mekaniju, trošniju stijenu ili svoj pravac djelovanja usmjeri po diskontinuitetu u stijenskoj masi. Kod bušenja s dubinskim čekićem rijetko se događa značajnija inklinacija, osim u ekstremnim uvjetima, dok je kod vanjskog čekića to češći slučaj, pogotovo na većim dubinama.

Dubinski čekić odlikuje se mogućnošću korištenja u mnogo različitih vrsta stijena, od mekih i srednje tvrdih do tvrdih i vrlo tvrdih, što nije slučaj kod vanjskog čekića. Kod bušenja vrlo tvrdih stijena vanjskim čekićem postoji veliki rizik od devijacije bušotine te kruna može zaglaviti. Vanjski čekić proizvodi vrlo veliku buku zbog rada čekića na površini. Emisija buke može se smanjiti oblaganjem čekića zvučnom izolacijom (slika 3-6.).



Slika 3-6. Zvučna izolacija vanjskog bušaćeg čekića (Atlas Copco, 2010.)

Minimalni promjer bušaće krune kod dubinskih čekića ograničen je na 89 mm zbog konstrukcije čekića, dok vanjski čekić može izbušiti rupu minimalnog promjera 51 mm.

Bušenje dubinskim čekićem energetski je učinkovitije zbog korištenja komprimiranog zraka koji pogoni čekić i za ispuhivanje bušotina. Izvedbom čekića također su anulirani gubici udarne sile na bušaćim cijevima, jer čekić djeluje izravno na krunu.

Bušilice s dubinskim čekićem imaju više prednosti kod bušenja minskih bušotina od bušilica s vanjskim čekićem, međutim postoji i razlika u cijeni. Bušilice s dubinskim čekićem su skuplje, ali dugoročno isplativije.

Prednosti dubinskog (DTH) čekića u odnosu na vanjski („top hammer“) čekić:

- mogućnost bušenja u gotovo svim vrstama stijena.
- veća brzina bušenja pri bušenju dubljih bušotina iznad 20 m
- manji troškovi bušenja
- ravnije i čišće bušotine
- široki raspon mogućih promjera bušotina bez velikih povećanja troškova
- tiši rad
- zrak koji se koristi za pogon čekića, koristi se i za iznošenje nabušenih čestica, pa je manja potrošnja komprimiranog zraka

Prednosti vanjskog („Top hammer“) čekića u odnosu na dubinski (DTH):

- manja nabavna cijena bušilice
- veća brzina pri bušenju plitkih bušotina
- mogućnost bušenja manjeg profila bušotina

Danas je bušenje s dubinskim čekićem najprimjenjivija metoda bušenja minskih bušotina zbog svojih prednosti, no u nekim je uvjetima rada ipak povoljnija metoda bušenja s vanjskim čekićem. Nama su zanimljive obje metode te ćemo ih u ovom radu detaljnije opisati (Kujundžić, 2006., Atlas Copco 2006.)

3.2.4. „Coprod“ sustav bušenja

COPROD sustav bušenja proizvod je švedskog proizvođača bušilica i opreme za bušenje, „Atlas Copco“. Ovaj sustav objedinjuje bušenje s dubinskim i vanjskim čekićem. Vrlo je složene konstrukcije čekića, te koristi dvostruke bušaće cijevi. Uređaj za rotaciju ostvaruje rotacijsko djelovanje koje prenosi na vanjski sustav cijevi većeg promjera, dok se udarci čekića prenose na unutarnji sustav šipki. Bušaća kruna pričvršćena na prvu (dvostruku) bušaću cijev (slika 3-7.) rotaciju prima od vanjske cijevi, a udar od unutarnjeg sustava šipki. Između vanjskih cijevi i unutarnjih šipki struji komprimirani zrak za čišćenje bušotine koji izlazi kroz rupe na bušaćoj kruni.

Ovaj sustav bušenja je bolji, brži i ekonomičniji od ostalih sustava bušenja, no ne nailazi na veliku primjenu kod malih radilišta. Najčešće se konstruira na strojeve koji postižu vrlo veliki kapacitet, pa je i samim time preskup za primjenu na manjim radilištima, odnosno neisplativ. Zbog toga je u ovom radu samo kratko opisan.



Slika 3-7. “Coprod“ sustav (Atlas Copco, 2010.)

4. Svojstva stijena koja utječu na brzinu bušenja

Brzina bušenja stijene ovisi o mnogo parametara, osim tehničkih parametara, odnosno karakteristika stroja za bušenje, vrlo veliki utjecaj imaju i svojstva stijene. Kako bismo što točnije mogli izračunati brzinu bušenja, potrebno je dobro poznavati svojstva stijene i njihov utjecaj na bušenje.

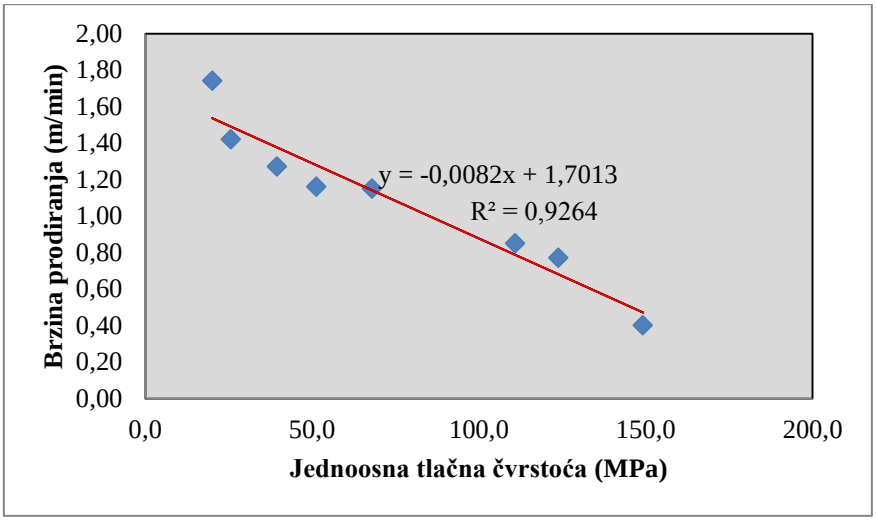
Mnogi su znanstvenici teoretski i eksperimentalno istraživali korelaciju između fizikalno - mehaničkih svojstava stijene i brzine bušenja. U ovom ćemo radu prikazati rezultate jedne od studija. S. Kahraman 2003. je godine objavio članak pod imenom *"Dominant rock properties affecting the penetration rate of percussive drills"* , koji se temelji na ispitivanju osam različitih vrsta stijena na površinskim kopovima i cestovnim trasama. Na terenu je izmjerena brzina prodiranja bušaće krune tijekom bušenja bušilice s vanjskim hidrauličkim čekićem te su prikupljeni uzorci koji su se naknadno ispitali u laboratoriju.

4.1. Obrada rezultata ispitivanja

Rezultati terenskog mjerenja brzine prodiranja i laboratorijskih ispitivanja na uzorcima stijena prikazani su tablično i grafički. Za svako svojstvo stijene koje se laboratorijski ispitalo, izrađena je posebna tablica s prikazom rezultata pridruženih pripadajućim stijenama te je u tablici naznačena i brzina prodiranja bušaćeg alata za svaku stijenu. Na temelju svake tablice izrađen je grafički prikaz. Rezultat grafičkog prikaza je funkcija zavisnosti, te je naznačen i koeficijent determinacije R^2 (Kahraman 2003.).

Tablica 4-1. Prikaz rezultata ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće i brzine prodiranja

Br.	Vrsta stijene	Jednoosna tlačna čvrstoća (Mpa)	Brzina prodiranja (m/min)
1.	Vapnenac	123,8	0,77
2.	Alterirani pješčenjak	20,1	1,74
3.	Pješčenjak	149,2	0,40
4.	Dolomit	68,0	1,15
5.	Vapnenac	51,3	1,16
6.	Dijabaz	110,9	0,85
7.	Lapor	39,5	1,27
8.	Metapješčenjak	25,7	1,42



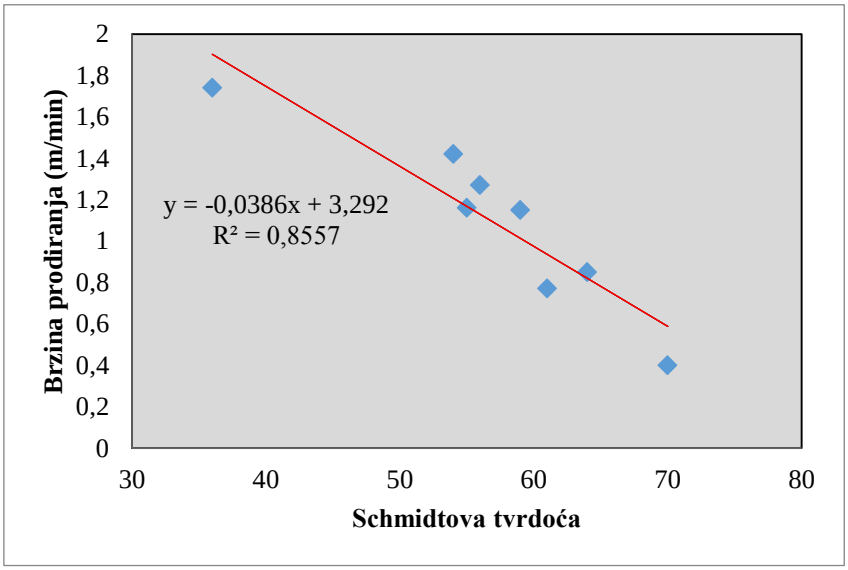
Slika 4-1. Ovisnost brzine prodiranja bušaćeg alata kroz stijenu o jednoosnoj tlačnoj čvrstoći stijene

U tablici 4-1. prikazani su rezultati laboratorijskog ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće te terenskog mjerenja brzina prodiranja bušaćeg alata za svaku vrstu stijene. Ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće stijena provodilo se na uzorcima valjkastog oblika promjera baze 33 mm i omjera promjera i visine 1:2. Nanošenje naprezanja bilo je u granicama od 0,5 do 1,0 MPa/s.

Terenskim i laboratorijskim ispitivanjem te obradom dobivenih podataka, svojstvo stijene koje pokazuje najveću korelaciju s brzinom prodiranja bušaćeg alata je jednoosna tlačna čvrstoća. To je dokazano grafom ovisnosti na slici 4-1.

Tablica 4-2. Prikaz rezultata Schmidtove tvrdoće i brzine prodiranja

Br.	Vrsta stijene	Schmidtova tvrdoća	Brzina prodiranja (m/min)
1.	Vapnenac	61	0,77
2.	Alterirani pješčenjak	36	1,74
3.	Pješčenjak	70	0,4
4.	Dolomit	59	1,15
5.	Vapnenac	55	1,16
6.	Dijabaz	64	0,85
7.	Lapor	56	1,27
8.	Metapješčenjak	54	1,42



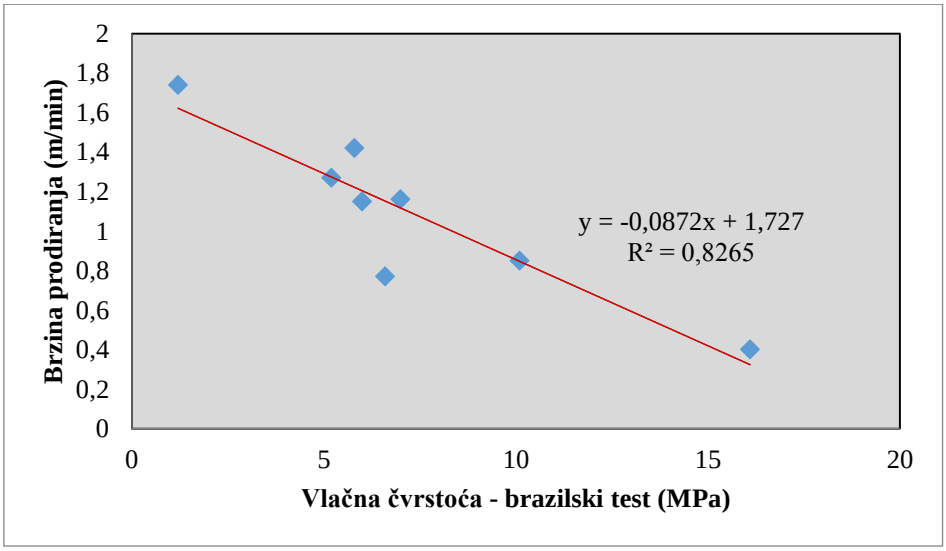
Slika 4-2. Ovisnost brzine prodiranja bušaćeg alata kroz stijenu o Schmidtovoj tvrdoći stijene

U tablici 4-2. prikazani su rezultati terenskog ispitivanja Schmidtove tvrdoće te brzina prodiranja bušaćeg alata za svaku vrstu stijene. Ispitivanja Schmidtove tvrdoće stijene izvodila su se na terenu Schmidtovim čekićem N-tipa. Na svakoj se točki mjerenja 10 puta primijenio Schmidtov čekić te je zabilježen najveći odskok. Postupak se ponovio najmanje 3 puta za svaku vrstu stijene, a kao rezultat uzeta je prosječna vrijednost.

Na grafu ovisnosti brzine prodiranja bušaćeg alata u stijenu o Schmidtovoj tvrdoći (4-2.) vidljiva je dobra korelacija između dviju veličina.

Tablica 4-3. Prikaz rezultata ispitivanja vlačne čvrstoće i brzine prodiranja

Br.	Vrsta stijene	Vlačna čvrstoća - brazilski test (Mpa)	Brzina prodiranja (m/min)
1.	Vapnenac	6,6	0,77
2.	Alterirani pješčenjak	1,2	1,74
3.	Pješčenjak	16,1	0,4
4.	Dolomit	6	1,15
5.	Vapnenac	7	1,16
6.	Dijabaz	10,1	0,85
7.	Lapor	5,2	1,27
8.	Metapješčenjak	5,8	1,42



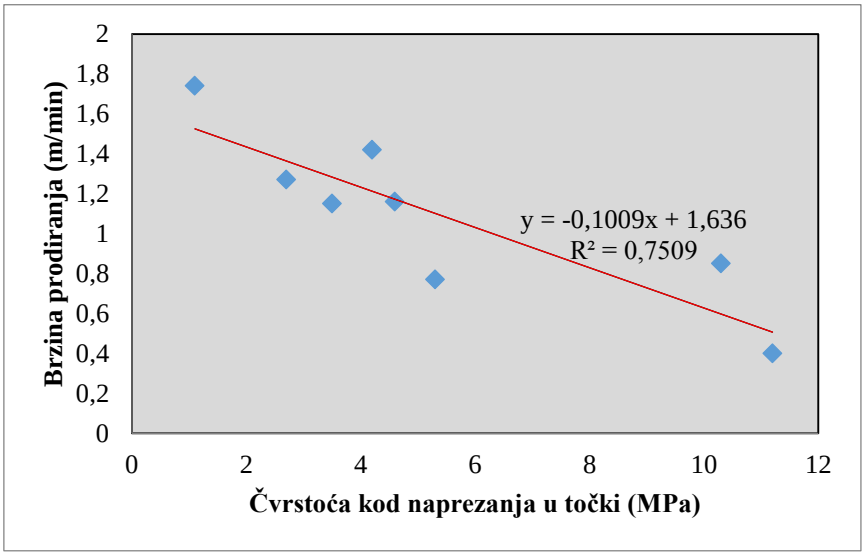
Slika 4-3. Ovisnost brzine prodiranja bušaćeg alata kroz stijenu o vlačnoj čvrstoći stijene

U tablici 4-3. prikazani su rezultati laboratorijskog ispitivanja vlačne čvrstoće te brzina prodiranja bušaćeg alata za svaku vrstu stijene. Vlačna čvrstoća ispitana je u laboratoriju Brazilskim testom, na uzorcima valjkastog oblika, promjera baze 33 mm i odnosa promjera i debljine 1:1. Kontinuirano je nanošeno naprezanje tako da do loma dođe u roku od 5 minuta od početka nanošenja naprezanja.

Na grafu ovisnosti brzine prodiranja bušaćeg alata u stijenu o vlačnoj čvrstoći stijene (slika 4-3.) vidljiva je korelacija između dviju veličina.

Tablica 4-4. Prikaz rezultata indeksa čvrstoće kod naprezanja u točki i brzine prodiranja

Br.	Vrsta stijene	Indeks čvrstoće kod naprezanja u točki (Mpa)	Brzina prodiranja (m/min)
1.	Vapnenac	5,3	0,77
2.	Alterirani pješčenjak	1,1	1,74
3.	Pješčenjak	11,2	0,4
4.	Dolomit	3,5	1,15
5.	Vapnenac	4,6	1,16
6.	Dijabaz	10,3	0,85
7.	Lapor	2,7	1,27
8.	Metapješčenjak	4,2	1,42



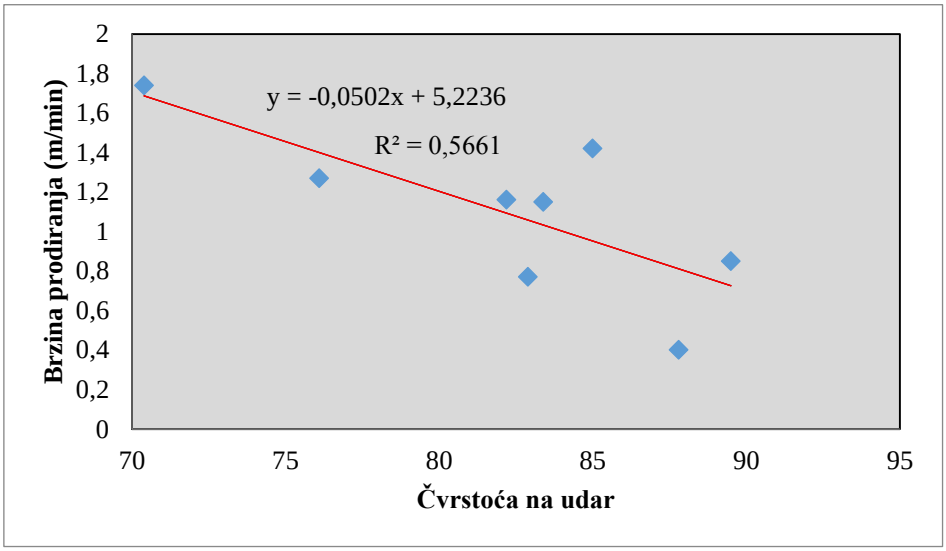
Slika 4-4. Ovisnost brzine prodiranja bušaćeg alata kroz stijenu o indeksu čvrstoće stijene kod naprezanja u točki

U tablici 4-4. prikazani su rezultati laboratorijskog ispitivanja indeksa čvrstoće kod naprezanja u točki te brzina prodiranja bušaćeg alata za svaku vrstu stijene. Ispitivanje indeksa čvrstoće kod naprezanja u točki izvedeno je u laboratoriju na PLT-uređaju. Koristili su se uzorci u obliku valjka promjera, baze 33 mm i visine 66 mm. Rezultati ispitivanja korigirani su na promjer uzorka od 50 mm.

Na grafu ovisnosti brzine prodiranja bušaćeg alata u stijenu o čvrstoći stijene kod naprezanja u točki (slika 4-4.) vidljiva je korelacija između dviju veličina.

Tablica 4-5. Prikaz rezultata čvrstoće na udar i brzine prodiranja

Br.	Vrsta stijene	Čvrstoća na udar	Brzina prodiranja (m/min)
1.	Vapnenac	82,9	0,77
2.	Alterirani pješčenjak	70,4	1,74
3.	Pješčenjak	87,8	0,4
4.	Dolomit	83,4	1,15
5.	Vapnenac	82,2	1,16
6.	Dijabaz	89,5	0,85
7.	Lapor	76,1	1,27
8.	Metapješčenjak	85,0	1,42



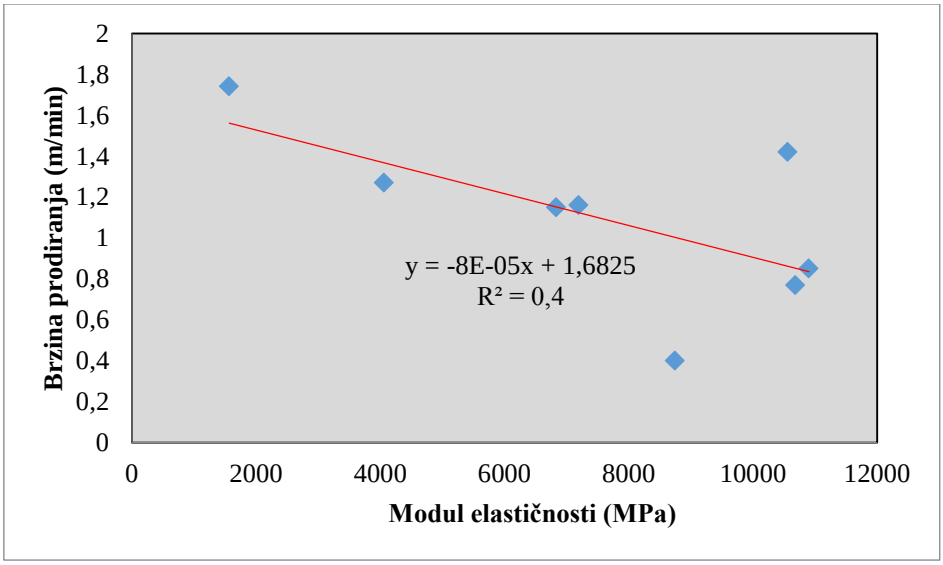
Slika 4-5. Ovisnost brzine prodiranja bušaćeg alata kroz stijenu o čvrstoći stijene na udar

U tablici 4-5. prikazani su rezultati laboratorijskog ispitivanja čvrstoće stijene na udar te brzina prodiranja bušaćeg alata za svaku vrstu stijene. Čvrstoća stijene na udar ispitana je u laboratoriju. Postupak ispitivanja bio je sljedeći: u cilindar promjera 42,86 mm stavlja se 100 g uzorka stijene, granulacija uzorka treba biti u rasponu od 3,175 do 9,525 mm, na uzorak u cilindru 20 puta spušta se uteg mase od 1,8 kg s visine od 30,48 cm. Količina stijene koja nakon ispitivanja ostane u početnom rasponu veličina uzima se kao indeks otpornosti na udar.

Na grafu ovisnosti brzine prodiranja bušaćeg alata u stijenu o čvrstoći stijene na udar (slika 4-5.) vidljiva je slaba korelacija između dviju veličina.

Tablica 4-6. Prikaz rezultata modula elastičnosti i brzine prodiranja

Br.	Vrsta stijene	Modul elastičnosti (Mpa)	Brzina prodiranja (m/min)
1.	Vapnenac	10682	0,77
2.	Alterirani pješčenjak	1566	1,74
3.	Pješčenjak	8746	0,4
4.	Dolomit	6830	1,15
5.	Vapnenac	7193	1,16
6.	Dijabaz	10901	0,85
7.	Lapor	4060	1,27
8.	Metapješčenjak	10562	1,42



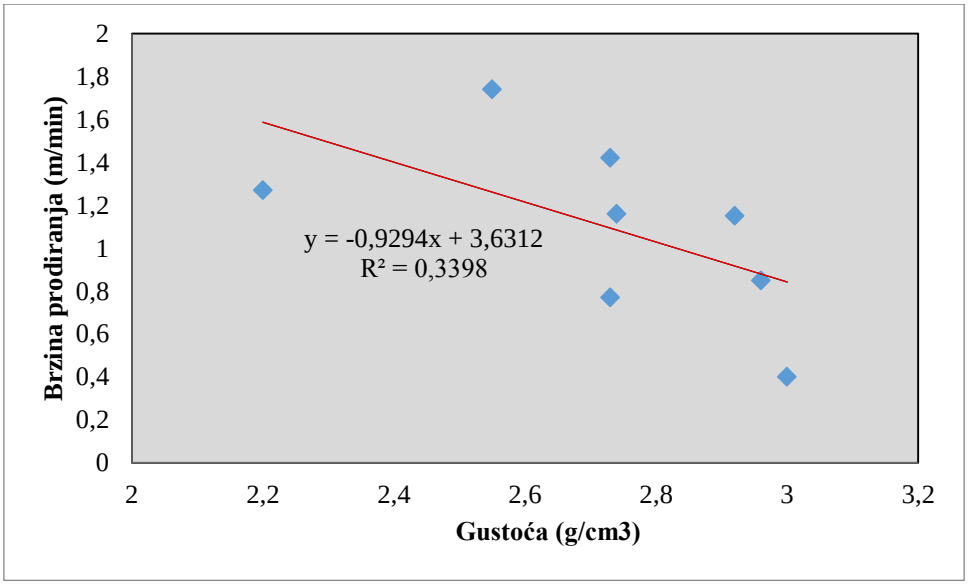
Slika 4-6. Ovisnost brzine prodiranja bušaćeg alata kroz stijenu o modulu elastičnosti stijene

U tablici 4-6. prikazani su rezultati laboratorijskog modula elastičnosti te brzina prodiranja bušaćeg alata za svaku vrstu stijene. Moduli elastičnosti izračunati su na temelju rezultata mjerenja osnih deformacija prilikom ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće.

Na grafu ovisnosti brzine prodiranja bušaćeg alata u stijenu o modulima elastičnosti (slika 4-6.) vidljiva je slaba korelacija između dviju veličina.

Tablica 4-7. Prikaz rezultata gustoće i brzine prodiranja

Br.	Vrsta stijene	Gustoća (g/cm^3)	Brzina prodiranja (m/min)
1.	Vapnenac	2,73	0,77
2.	Alterirani pješčenjak	2,55	1,74
3.	Pješčenjak	3,00	0,4
4.	Dolomit	2,92	1,15
5.	Vapnenac	2,74	1,16
6.	Dijabaz	2,96	0,85
7.	Lapor	2,2	1,27
8.	Metapješčenjak	2,73	1,42



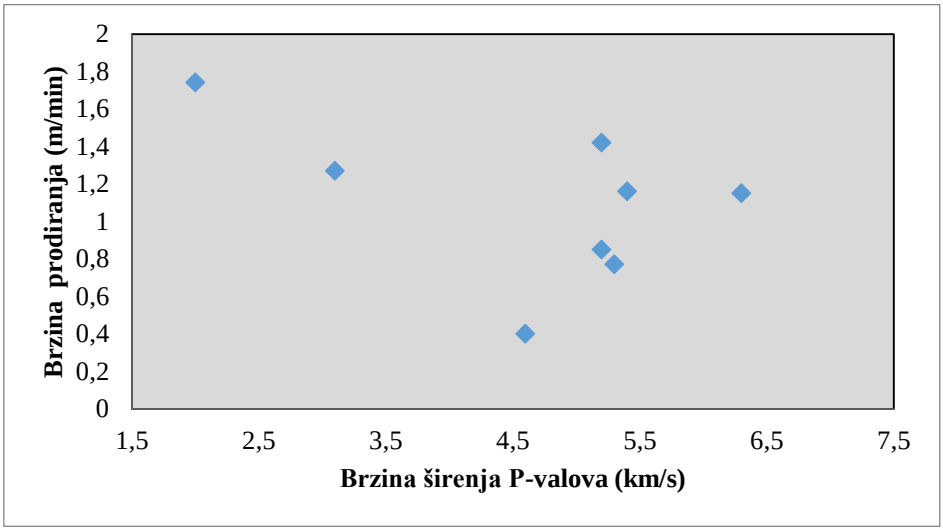
Slika 4-7. Ovisnost brzine prodiranja bušaćeg alata kroz stijenu o gustoći stijene

U tablici 4-7. prikazani su rezultati laboratorijskog ispitivanja gustoće te brzina prodiranja bušaćeg alata za svaku vrstu stijene. Gustoća stijene određena je u laboratoriju na uzorcima kojima je izračunat volumen te izmjerena masa. Omjer mase i volumena uzorka daje gustoću stijene.

Na grafu ovisnosti brzine prodiranja bušaćeg alata u stijenu o gustoći stijene (slika 4-7.) nazire se korelacija između dviju veličina.

Tablica 4-8. Prikaz rezultata brzine širenja P-valova i brzine prodiranja

Br.	Vrsta stijene	Brzina širenja P-valova (km/s)	Brzina prodiranja (m/min)
1.	Vapnenac	5,3	0,77
2.	Alterirani pješčenjak	2,0	1,74
3.	Pješčenjak	4,6	0,4
4.	Dolomit	6,3	1,15
5.	Vapnenac	5,4	1,16
6.	Dijabaz	5,2	0,85
7.	Lapor	3,1	1,27
8.	Metapješčenjak	5,2	1,42



Slika 4-8. Ovisnost brzine prodiranja bušaćeg alata kroz stijenu o brzini širenja P-valova

U tablici 4-8. prikazani su rezultati laboratorijskog ispitivanja brzine širenja P-valova te brzina prodiranja bušaćeg alata za svaku vrstu stijene. Brzina širenja valova kroz stijenu određena je u laboratoriju na uzorcima dimenzija 13x20x12 cm uređajem koji pomoću odašiljača odašilje valove u uzorak te ih pomoću prijemnika registrira, a radi na frekvenciji od 54 kHz.

Iz grafa ovisnosti brzine prodiranja bušaćeg alata u stijenu o brzini širenja P-valova kroz stijenu (slika 4-8.) možemo zaključiti da ne postoji korelacije između dviju veličina.

4.2. Rezultat analize

Na temelju terenskih i laboratorijskih ispitivanja te obradom rezultata ispitivanja, ispitane su zavisnosti između fizikalno-mehaničkih svojstava stijene i brzina prodiranja bušaćeg alata. Jednoosna tlačna čvrstoća, Schmidtova tvrdoća, vlačna čvrstoća (brazilski test) i čvrstoća kod opterećenja u točki (PLT – test), svojstva su stijene koja su pokazala najveći utjecaj na brzinu prodiranja bušaće krune. Zamijećen je i slabiji utjecaj između brzine prodiranja i modula elastičnosti te prirodne gustoće, dok utjecaj brzine širenja P-valova nije utvrđen.

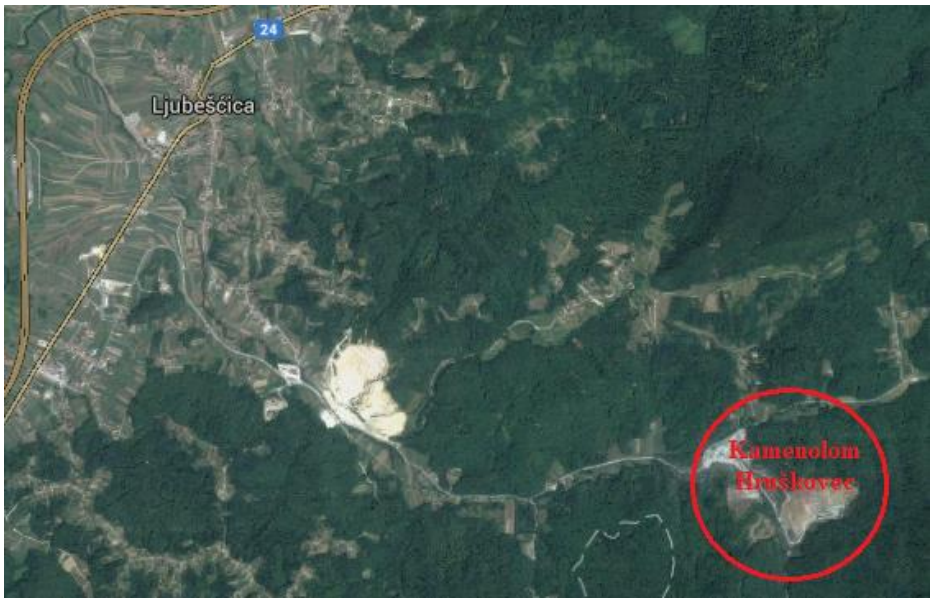
5. Terenska mjerenja

U sklopu ovog rada obavljena su terenska mjerenja s ciljem usporedbe teoretskih izračuna brzine bušenja i stvarnog stanja na terenu. Prvo terensko mjerenje izvedeno je 05. svibnja 2015. na eksploatacijskom polju "Straža-Vinceli" pokraj mjesta Đurmanec. Drugo je mjerenje izvedeno 14. svibnja 2015. na eksploatacijskom polju "Hruškovec" pokraj mjesta Ljubešćica.

5.1. Eksploatacijsko polje "Hruškovec"

Eksploatacijsko polje "Hruškovec" nalazi se u Varaždinskoj županiji oko 5 km istočno od mjesta Ljubešćica u blizini Novog Marofa. (slika 5-1.) Na njemu se vrši eksploatacija tehničko građevnog kamena. Mineralna sirovina koja se eksploatira je dijabaz (slika 5-2.), koji se većinom koristi za proizvodnju gornjeg habajućeg sloja asfalta. Tvrtka koja je koncesionar i koja izvodi radove zove se Kaming d.d. Ljubešćica. Na tom su eksploatacijskom polju izvedena mjerenja brzine bušenja.

Eksploatacija mineralne sirovine na ovom kamenolomu izvodi se bušenjem minskih bušotina te miniranjem stijenske mase. Odminirana stijenska masa bagerima se utovaruje u dampere i transportira do oplemenjivačkog postrojenja, gdje se usitnjuje i klasira na frakcije pogodne za proizvodnju asfalta i ostale potrebe.



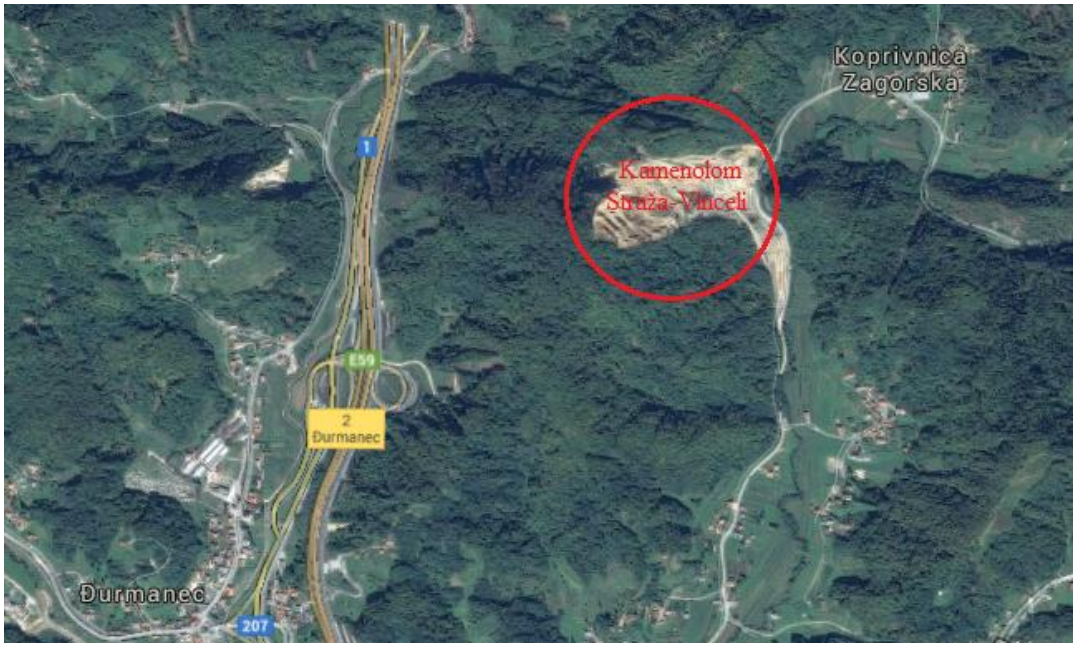
Slika 5-1. Zemljopisni položaj eksploatacijskog polja "Hruškovec" (Google Maps, 2015.)



Slika 5-2. Kamenolom dijabaza

5.2. Eksploatacijsko polje “Straža-Vinceli”

Eksploatacijsko polje “Straža-Vinceli” nalazi se u Krapinsko - zagorskoj županiji, 2 km istočno od mjesta Đurmanec pokraj sela Koprivnica Zagorska (slika 5-3.). Eksploataciju mineralne sirovine u ovom kamenolomu izvodi tvrtka Viadukt d.d., dok je Geobim d.o.o. izvođač bušenja minskih bušotina. Mineralna sirovina je vapnenac lošije kvalitete, uz primjese gline i lapora, što je vidljivo na slici 5-4. Ova mineralna sirovina nalazi svoju primjenu u cestogradnji za izgradnju nasipa.



Slika 5-3. Geografski položaj kamenoloma “Straža-Vinceli” (Google Maps, 2015.)

Kamenolom je razvijen u 7 etaža različitih visina od 10 do 20 m. Tehnologija eksploatacije izvodi se bušenjem minskih bušotina i miniranjem. Odminirana stijenska masa gravitacijski se spušta na radni plato, gdje se hidrauličnim čekićem usitnjavaju vangabaritni blokovi stijene. Sirovina koja nakon toga ne zahtijeva dodatno oplemenjivanje, utovaračima i bagerima tovari se izravno na kamione, koji materijal odvoze do mjesta ugradnje. Po potrebi, stijena se drobi u mobilnom drobiličnom postrojenju.



Slika 5-4. Mjesto mjerenja

5.3. Atlas Copco ROC F6

Roc F6 slika 5-5. model je bušilice na kojoj je izvedeno mjerenje brzine bušenja na kamenolomu "Hruškovec". Proizvođač ove bušilice poznata je švedska tvrtka „Atlas Copco", koja se bavi proizvodnjom rudarske i geotehničke opreme i strojeva.



Slika 5-5. Atlas Copco ROC F6 (Atlas Copco, 2010.)

Tablica 5-1. Tehničke karakteristike bušilice

Karakteristike Bušilice	
Proizvođač	Atlas Copco
Tip	ROC F6
Snaga pogonskog agregata	186 (kW)
Radni tlak kompresora	7-14 (bar)
Protok zraka	188 (l/s)
Maksimalni tlak hidraulične pumpe	250 (bar)
Masa	14 700 (kg)
Maks. brzina	3,6 (km/h)
Vučna sila	110 (kN)
Maks. nagib	20°
Dužina šipki	4 (m)

Tablica 5-2. Podatci o čekiću

Karakteristike DTH čekića	
Proizvođač	Atlas Copco
Tip	COP 34
Tlak zraka	10-12,5 (bar)



Slika 5-6. Unutrašnjost kabine bušilice

Roc F6 moderna je bušilica opremljena vrlo kvalitetnom i sofisticiranom opremom, namijenjena za rad na zahtjevnim terenima i u različitim vrstama stijena. Radni alat ove bušilice je dubinski (DTH) čekić model „COP 34 high-capacity 3.5", čije su karakteristike prikazane u tablici 5-2. Tehničke karakteristike bušilice prikazane su u tablici 5-1.

Operater za ovim strojem, odnosno bušač, upravlja procesom bušenja iz kabine (slika 5-6.), koja je opremljena elektronskim kontrolama, klimatizacijskim uređajem i monitorom na kojem se može pratiti cijeli proces bušenja. Također osigurava dobru preglednost prema radnom mehanizmu, te pojačanjima na krovu štiti operatera od mogućih opasnosti odrona i sl. Radni su uvjeti pri upravljanju ovim strojem vrlo dobri.

Vodilica ili lafeta te „ruka" opremljene su nizom hidrauličnih cilindara koji omogućavaju automatsko obavljanje svih radnji pri bušenju, tako da bušač ne mora izlaziti iz kabine, već sve obavlja preko komandi.

Bušilica također posjeduje sustav otprašivanja pomoću kojeg se na vrhu bušotine usisavaju nabušene čestice koje zračnom strujom putuju s dna bušotine. Nakon usisavanja u aerociklonu odvajaju se sitnije od krupnijih čestica. Sitnije čestice putuju do vrećastih filtera, koji ih izdvajaju iz zračne struje te u okoliš odlazi čisti zrak.

5.4. Atlas Copco ROC D7

Roc D7 (slika 5-7.) model je bušilice na kojoj je izvedeno mjerenje brzine bušenja na kamenolomu "Straža-Vinceli". Proizvođač ove bušilice također je tvrtka „Atlas Copco". Ovaj stroj kao radni alat koristi vanjski hidraulični čekić (slika 5-8.). Odlikuje se velikom brzinom prodiranja te pri bušenju plitkih minskih bušotina u mekim i srednje tvrdim stijenama postiže veliki kapacitet.



Slika 5-7. Bušilica Atlas Copco ROC D7



Slika 5-8. Hidraulični bušaći čekić

Tehničke karakteristike bušilice ROC D7 prikazane u tablici 5-3. razlikuju se od karakteristika ROC F6. Korištenje različitih bušaćih čekića zahtjeva i različitu snagu i kapacitet kompresora i hidraulične pumpe, pa samim time i snagu pogonskog agregata.

Karakteristike površinskog bušaćeg čekića navedene su u tablici 5-4. Čekić, kao glavni dio stroja, svojim izvedbama direktno utječe na kvalitetu i brzinu bušenja. Ova izvedba čekića osim rotacije i udara u smjeru bušenja, ima mogućnost generiranja udarne sile suprotno od smjera bušenja, odnosno pri izvlačenju bušaćih cijevi. Na taj se način izbjegava zaglavljivanje bušaće krune te njen gubitak u bušotini.

Kod upravljanja ovim strojem vrlo veliku ulogu ima iskustvo bušača. Ukoliko se radovi izvode u lošim stijenama, s čestom izmjenom litoloških članova te diskontinuitetima ispunjenim glinom, kao što je slučaj na kamenolomu "Straža-Vinceli", iskustvo bušača značajno dolazi do izražaja.

Tablica 5-3.Tehničke karakteristike stroja

Karakteristike stroja	
Proizvođač	„Atlas Copco“
Tip	ROC D7
Snaga pogonskog agregata	168 (kW)
Radni tlak kompresora	6-7 (bar)
Protok zraka	105 (l/s)
Maksimalni tlak hidraulične pumpe	250 (bar)
Masa	14 200 (kg)
Maks. brzina	3,6 (km/h)
Vučna sila	110 (kN)
Maks. nagib	20°
Dužina šipki	4 (m)

Tablica 5-4. Podaci o čekiću

Karakteristike bušaćeg čekića	
Proizvođač	„Atlas Copco“
Tip	COP 1838 ME
Snaga	18 (kW)
Tlak ulja	230 (bar)
Frekvencija udaraca	60 (Hz)
Okretni moment	630 (Nm)

5.5. Način izvođenja mjerenja

Tijekom bušenja kosih minskih bušotina na površinskim kopovima "Straža-Vinceli" i "Hruškovec", ručnom je štopericom mjereno efektivno vrijeme bušenja te su praćeni tlakovi na mjeračima instaliranim u bušilici. Svi su se rezultati upisivali na obrazac. Također je praćena izmjena litoloških članova, pri čemu su bilježene eventualne promjene u režimu rada bušilice.

5.6. Prikaz rezultata mjerenja

Tablica 5-5. Rezultati mjerenja na eksploatacijskom polju "Hruškovec"

Interval bušenja	1		2		3		4		5		6	
Program bušenja	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Duljina efektivnog bušenja (m)	2,00	4,00	2,00	4,00	2,00	2,00	1,00	1,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Vrijeme trajanja efektivnog bušenja (s)	198	347	319	575	389	345	26	22	119	110	162	145
Brzina efektivnog bušenja (m/min)	0,61	0,69	0,38	0,42	0,31	0,35	2,31	2,73	1,01	1,09	0,74	0,83
Razlika 1. i 2. program bušenja (%)	12,37		9,87		11,31		15,38		7,56		10,49	
Prosječna brzina efektivnog bušenja (m/min)	0,89						1,02					
Teoretska brzina (m/min) (Kahraman)	0,35	0,43	0,35	0,43	0,35	0,43	0,35	0,43	0,35	0,43	0,35	0,43
Schmidtova tvrdoća	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62
Tlak ulja (rotacija) (bar)	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Tlak ulja (potisak) (bar)	25	35	25	35	25	35	25	35	25	35	25	35
Protok zraka (l/s)	188	188	188	188	188	188	188	188	188	188	188	188
Tlak komprimiranog zraka (bar)	10,0	12,5	10,0	12,5	10,0	12,5	10,0	12,5	10,0	12,5	10,0	12,5
Promjer bušaće krune (mm)	91		91		91		91		91		91	
Dubina bušenja (m)	24		24		24		24		24		24	
Broj šipki	5		5		5		5		5		5	
Nagib bušotine (°)	75		75		75		75		75		75	
Opis stijene (vrsta, kvaliteta, prisutnost gline, diskontinuiteti, voda...)	Trošna stijena		Dijabaz (tipičan zvuk)		Dijabaz (tipičan zvuk)		Vrlo trošna (mekana stijena) promjena boje prašine		Trošna stijena		Trošna stijena	

U tablici 5-5. prikazani su rezultati mjerenja na eksploatacijskom polju „Hruškovec". U cilju utvrđivanja samo efektivne brzine bušenja, mjerenje je izvođeno na intervalima kontinuiranog bušenja bez zastoja. Stroj, tijekom čijeg rada je izvođeno mjerenje, ima mogućnost korištenja dva programa bušenja. Kod uključivanja prvog ili drugog programa bušenja, automatski se namještaju tlakovi ulja i komprimiranog zraka za bušenje. Njihovi su iznosi za pojedini program također navedeni u tablici.

5.6.1. Kahramanova relacija za proračun brzine bušenja dubinskog čekića

Kahramanove relacije za proračun brzine bušenja objašnjene su u radu (Kahraman, 1999.). Za potrebe ovog rada izdvojena je jednadžba za proračun brzine bušenja bušilica s dubinskim čekićem. Jednadžba je upotrebljiva za bušilice s promjerom bušaće krune od 90 do 100 mm, tlakom potiska bušaćeg pribora od 12 do 22 bara, tlakom rotacije od 90 do 100 bara i tlaka komprimiranog zraka od 5 do 8 bara. Ovi su bušaći parametri uspoređeni s parametrima bušilice na kojoj je mjerena brzina bušenja u tablici 5-6. Model je testiran, iako je vidljivo da se svi parametri ne poklapaju.

Tablica 5-6. Usporedba bušaćih parametara primjenjivih u Kahramanovom modelu i karakteristika bušilice „Atlas Copco ROC F6"

Bušaći parametri	Kahraman	ROC F6
Promjer krune (mm)	90 do 100	91
Tlak ulja (potisak) (bar)	12 do 22	25 do 35
Tlak ulja (rotacija) (bar)	40 do 60	25
Tlak zraka (bar)	5 do 8	10 do 12,5

Pri tim ulaznim parametrima upotrebljiva je jednadžba:

$$PR = \ 3{,}24 \cdot \frac{(Pd)^{0.826}}{R_n^{1.900}} \qquad R^2 = 0{,}89$$

gdje je:

PR - brzina bušenja (m/min)

P – tlak komprimiranog zraka (bar)

d - promjer bušaće šipke (mm)

R_n - Schmidtova tvrdoća (N tip).

Koeficijent determinacije R^2 je visok te se jednadžba smatra upotrebljivom u praksi, pri danim uvjetima, uz veliku pouzdanost dobivenih rezultata.

Ukoliko želimo koristiti ovu formulu za proračun teoretske brzine bušenja, treba nam podatak o Schmidtovoj tvrdoći stijene. Njega nismo izmjerili na terenu, ali su nam na raspolaganju podatci o tlačnoj čvrstoći stijene dobiveni pri ispitivanju kvalitete stijenske mase u ležištu.

Laboratorijski uzorci na kojima je ispitivana tlačna čvrstoća bili su kocke brida 5 cm. Međutim, Kahraman je svoje modele razvio ispitujući jednoosnu tlačnu čvrstoću na uzorcima dimenzija propisanih prema metodi ispitivanja predloženoj od Međunarodnog društva za mehaniku stijena (ISRM). Dokazano je da su rezultati ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće prema metodi predloženoj od ISRM-a manji od rezultata ispitivanja na kockama. Zbog toga je vrijednost tlačne čvrstoće dobivene ispitivanjem na kockama korigirana pomoću relacije predložene od ASTM-a (ASTM, 1942.):

$$\sigma_{c1} = \frac{\sigma_c}{0.788 + \frac{0.222}{\left(\frac{h}{d}\right)}}$$

gdje je:

σ_{c1} - tlačna čvrstoća uzoraka s omjerom h/d = 1 (MPa)

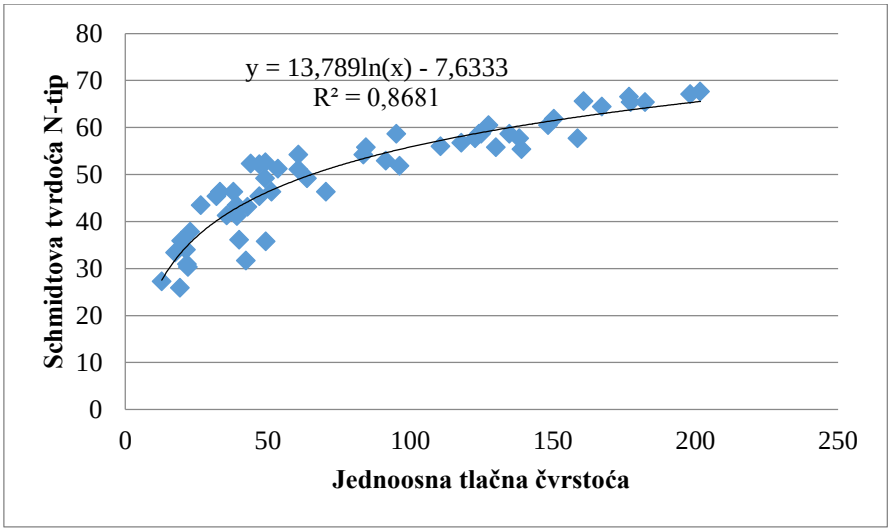
σ_c - tlačna čvrstoća uzoraka s omjerom h/d > 1 (MPa)

D - promjer uzoraka ukoliko su u obliku jezgre, tj. duljina brida ukoliko su uzorci u obliku kocke (mm)

h- visina uzorka. (mm)

Jednoosna tlačna čvrstoća izmjerena na uzorku h/d = 1 iznosi 186,6 MPa. Preračunata jednoosna tlačna čvrstoća dobivena je uz omjer h/d = 2,5 prema preporukama ISRM-a. Preračunata vrijednost jednoosne tlačne čvrstoće iznosi 163,61 MPa. Volumna gustoća je 2,807 t/m^3.

Tako dobivenom jednoosnom tlačnom čvrstoćom stijene možemo proračunati Schmidtovu tvrdoću pomoću podataka ispitivanja prikazanih u radu (Mishra, Basu, 2013.). Autori su ispitivali Schmidtovu tvrdoću (N-tipom čekića) i jednoosnu tlačnu čvrstoću 55 različitih vrsta stijena. Statističkom obradom podataka pronađena je ovisnost Schmidtove tvrdoće o jednoosnoj tlačnoj čvrstoći prikazana na slici 5-9.



Slika 5-9. Ovisnost Schmidtove tvrdoće o jednoosnoj tlačnoj čvrstoći

$$R_n = 13{,}789 \ln(UCS) - 7{,}6333 \quad R^2 = 0{,}8681$$

gdje je:

R_n – Schmidtova tvrdoća (N-tip)

UCS – jednoosna tlačna čvrstoća (MPa)

Koeficijent determinacije R^2 je visok te se jednadžba smatra upotrebljivom u praksi, pri danim uvjetima, uz veliku pouzdanost dobivenih rezultata. Izračunata Schmidtova tvrdoća za prethodno izračunatu jednoosnu tlačnu čvrstoću (163,61 MPa) iznosi 62,65.

S ovim podatkom o Schmidtovoj tvrdoći, preko formule za proračun brzine bušenja za dubinski čekić (Kahraman, 1999.), izračunali smo teoretske vrijednosti brzine bušenja prikazane u tablici 5-5. Usporedbom s izmjerenim brzinama na terenu vidimo da se teoretske i stvarne vrijednosti brzine bušenja gotovo poklapaju u drugom i trećem intervalu bušenja, dok se na ostalim intervalima razlikuju. Razlog tome je što se u drugom i trećem intervalu buši u dijabazu za kojeg vrijede rezultati laboratorijskog ispitivanja stijene. U opisu stijene na dnu tablice 5-5. opisana je stijena za svaki interval. Shodno tome ponašaju se i brzine bušenja.

Tablica 5-7. Rezultati mjerenja na eksploatacijskom polju “Straža-Vinceli”

Interval bušenja	1		2		3		4		5	
Program bušenja	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Duljina efektivnog bušenja (m)	2,00	2,00	2,00	4,00	4,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Vrijeme trajanja efektivnog bušenja (s)	63,0	50,0	65,0	108,0	115,0	57,0	65,0	60,0	95,0	86,0
Brzina efektivnog bušenja (m/min)	1,90	2,40	1,85	2,22	2,09	2,11	1,85	2,00	1,26	1,40
Razlika 1. i 2. program bušenja (%)	20,63		16,92		0,87		7,69		9,47	
Prosječna brzina efektivnog bušenja (m/min)	1,79				2,02					
Teoretska brzina (m/min) Kahraman 03 / UCS	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16
Jednoosna tlačna čvrstoća (Mpa)	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65
Schmidtova tvrdoća	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
Tlak ulja (udar) (bar)	140	180	140	180	140	180	140	180	140	180
Tlak ulja (rotacija)(bar)	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Tlak ulja (potisak)(bar)	40	50	40	50	40	50	40	50	40	50
Frekvencija (min^{-1})	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600
Protok ulja (l/min)	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
Protok zraka (l/s)	105	127	105	127	105	127	105	127	105	127
Tlak komprimiranog zraka (bar)	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00
Promjer bušaće krune (mm)	83		84		85		86		87	
Dubina bušenja(m)	19		19		19		19		19	
Broj šipki	5		5		5		5		5	
Nagib bušotine(°)	80		75		76		77		78	
Ukupno vrijeme bušenja (min)	10		13		30		15		13	
Opis	Vapnenac, lapor,prisutnost gline, trošna stijena, diskontinuiteti		Vapnenac, lapor,prisutnost gline, trošna stijena, diskontinuiteti		Vapnenac, lapor,prisutnost gline, trošna stijena, diskontinuiteti		Vapnenac, lapor,prisutnost gline, trošna stijena, diskontinuiteti		Vapnenac, lapor,prisutnost gline, trošna stijena, diskontinuiteti	

U tablici 5-7. prikazani su rezultati mjerenja na eksploatacijskom polju “Straža-Vinceli”. U cilju utvrđivanja samo efektivne brzine bušenja, mjerenje je izvođeno na intervalima kontinuiranog bušenja bez zastoja. Stroj tijekom čijeg je rada izvođeno mjerenje, ima mogućnost korištenja dva programa bušenja. Kod uključivanja prvog ili drugog programa bušenja automatski se namještaju tlakovi ulja i komprimiranog zraka za bušenje. Njihovi iznosi za pojedini program također su navedeni u tablici.

5.6.2. Kahramanov model za proračun brzine bušenja vanjskog čekića

Kahramanovi modeli za proračun brzine bušenja objašnjeni su u njegovom radu (Kahraman, 1999.). Za potrebe ovog rada izdvojena je jednadžba za proračun brzine bušenja bušilica s vanjskim čekićem. Jednadžba je upotrebljiva za bušilice s promjerom bušaće krune od 75 do 102 mm, tlakom potiska bušaćeg pribora od 60 do 100 bara, snagom čekića 11,5 do 17,5 kW, tlakom rotacije od 50 do 70 bara i tlaka ulja na udarnom čekiću 100 do 150 bara. Ovi su bušaći parametri uspoređeni s parametrima bušilice na kojoj je mjerena brzina bušenja u tablici 5-8. Model je testiratran, iako je vidljivo da se svi parametri ne poklapaju.

Tablica 5-8. Usporedba bušaćih parametara primjenjivih u Kahramanovom modelu i bušilice Atlas Copco ROC D7

Bušaći parametri	**Kahrlman**	**ROC D7**
Promjer krune (mm)	76 do 102	83
Snaga čekića (kW)	11,5 do 17,5	18
Tlak ulja (potisak)(bar)	60 do 100	40 do 50
Tlak ulja (udar)(bar)	100 do 150	140 do 180
Tlak ulja (rotacija)(bar)	50 do 70	50

Pri tim ulaznim parametrima Kahramanovog modela upotrebljiva je jednadžba:

$$PR = \ 0{,}47 \cdot \frac{b_{pm}^{0,375}}{\sigma_c^{0,534} * q^{0.093}} \qquad R^2 = 0{,}85$$

gdje je:

PR – brzina bušenja (m/min)

σ_c – jednoosna tlačna čvrstoća (Mpa)

b_{pm} – frekvencija udara (min^{-1})

q – udio kvarca (%)

Koeficijent determinacije R^2 je visok te se jednadžba smatra upotrebljivom u praksi, pri danim uvjetima, uz veliku pouzdanost dobivenih rezultata.

Ova formula kao ulazni podatak između ostalog sadrži i udio kvarca. Stijena u kojoj su rađena ispitivanja nema kvarca u sebi, odnosno udio kvarca je 0 %. U tom slučaju formula postaje neupotrebljiva.

Za proračun brzine prodiranja bušaćeg alata u stijenu uzeta je formula iz grafa na slici 4-1. (Ovisnost brzine prodiranja bušaćeg alata kroz stijenu o jednoosnoj tlačnoj čvrstoći stijene). Za korištenje te formule u proračunu brzine bušenja potreban je podatak o jednoosnoj tlačnoj čvrstoći. Na raspolaganju je podatak o Schmidtovoj tvrdoći dobiven ispitivanjem dvaju uzorka stijene Schmidtovim čekićem L-tipa u geomehaničkom laboratoriju RGN fakulteta. Jednoosna tlačna čvrstoća izračunata je prema formuli (Shalabi, 2006), koja kao ulazni parametar koristi prethodno ispitanu Schmidtovu tvrdoću.

$$UCS = 3{,}201 \cdot H_R - 46{,}59 \quad R = 0{,}76$$

gdje je:
UCS – jednoosna tlačna čvrstoća (Mpa)
H_R – Schmidtova tvrdoća (L-tip)

Koeficijent determinacije R je visok te se jednadžba smatra upotrebljivom u praksi, pri danim uvjetima, uz veliku pouzdanost dobivenih rezultata. Izračunata jednoosna tlačna čvrstoća za Schmidtovu tvrdoću od 35 iznosi 65,44 MPa.

Pomoću izračunate jednoosne tlačne čvrstoće proračunata je teoretska brzina prodiranja bušaćeg alata (tablica 5-7.) prema Kahramanovoj formuli za proračun brzine bušenja za vanjski bušaći čekić. Razlike teoretski izračunate brzine s brzinom izmjerenom na terenu nastale su zbog specifičnih uvjeta na terenu i razlika bušaćih parametara kod Kahramanovog modela i naših terenskih mjerenja. Na eksploatacijskom polju "Straža-Vinceli" uvjeti za bušenje su vrlo specifični zbog prisutnosti gline, vrlo trošne stijene te diskontinuiteta. Kod takvih uvjeta brzina efektivnog bušenja je veća zbog manjih otpora. No ukupno vrijeme bušenja često se produljuje zbog velike mogućnosti nastajanja čepa od gline koji sprječava izlazak nabušenih čestica te mogućih urušavanja stijenki bušotine. Ako se ove činjenice uzmu u obzir, razlike između teoretskih izračuna i mjerenja na terenu su neizbježne. Možemo zaključiti da bi ovaj proračun mogao biti mjerodavan ukoliko se mjerenju i proračunu pristupi detaljnije te se uzme u obzir stanje na terenu.

6. ZAKLJUČAK

Usporedbom efektivne brzine bušenja dobivene terenskim mjerenjima s teoretskim izračunima, dobiveni se rezultati mogu ocijeniti kao mjerodavni, ali se pri upotrebi teoretskih proračuna velika pažnja mora posvetiti uvjetima pri kojima su izvedeni. Na površinskom kopu "Hruškovec" izbušena su i izmjerena dva intervala u kojima su teoretska brzina bušenja i stvarna vrlo bliske. Na tim je intervalima bušena stijena za koju vrijede laboratorijska ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće koja je bila temelj teoretskom proračunu, dok se za ostale intervale ne može reći da vrijedi isto. Na ostalim intervalima bušena je trošna, mekanija stijena za koju zasigurno ne vrijede fizikalno - mehanička svojstva na temelju kojih je izvedena jednadžba zavisnosti brzine bušenja pri teoretskom razmatranju. Na površinskom kopu "Straža-Vinceli" svaki interval bušenja bio je specifičan, no prosječna brzina bušenja pokazala je bliski rezultat teoretskom izračunu. Na tom je eksploatacijskom polju specifična situacija jer je prisutna glina, koja se, ako je potpuno suha vrlo lako buši, no ako je mokra, vrlo teško. Iz ovog se može zaključiti da je ta specifičnost vjerojatno razlog odstupanju između teoretskog izračuna i izmjerenih vrijednosti.

U ovom radu analizirana je efektivna brzina bušenja, odnosno brzinu prodiranja bušaćeg alata kroz stijenu. U kompletnom proračunu brzine bušenja ovo je samo jedan segment, kojem još treba dodati vrijeme potrebno za nastavljanje bušaćih šipki, vađenje bušaćih šipki i premještanje stroja.

Tehnička dostignuća današnjih strojeva uvelike ubrzavaju i pojednostavljuju kako sve poslove, tako i bušenje. Ovaj posao naizgled izgleda kao i svako drugo upravljanje rudarskim strojem, što možda u nekim slučajevima i jest tako. Obavljanjem učeničke i studentske prakse na pomoćnim poslovima bušenja minskih bušotina te mjerenja za izradu ovog rada također u suradnji s bušačima, uvidio sam veliku razliku u radu bušača koji imaju mnogo iskustva te onih koji ga nemaju. Razlike se vide od samog poznavanja i pristupa stroju, izvedivog kapaciteta, poznavanja stijene te iskustva u miniranju kao krajnjem cilju bušenja minskih bušotina. Na temelju toga može se zaključiti kako ljudski faktor ima vrlo veliku ulogu kod bušenja minskih bušotina. Njega je vrlo teško proračunati, no pravilnim upravljanjem ljudskim potencijalom mogu se postići dobri rezultati.

7. LITERATURA

A.S.T.M., 1942. Tentative method of test for compressive strength of natural building stone. A.S.T.M. Designation: C170-41T, A.S.T.M. Standards, str. 1102-1104.

Atlas Copco, 2010. Surface Crawlers, Sweden, URL: http://www.atlascopco.com/us/news/productnews/roc_f6.aspx (13. lipnja 2015).

Furukawa Rockdrill, 2015. Hydraulic Crawler drill HCR series, URL: http://www.frdusa.com/cms/frdrdd/page.html?p_name=Top-Hammer%20Drills%20Overview (13. lipnja 2015)

Google Maps., 2015. Satelitski snimak, URL: www.google.hr/maps/@46.2022071,15.8439316,2244m/data=!3m1!1e3?hl=hr (12. lipnja 2015)

Kahraman, S., 1999. Rotary and percussive drilling prediction using regression analysis, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 36, str. 981-989.

Kahraman, S., 2001. Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strenght of rock, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 38, str. 981–994.

Kahramana, S., Bilginb, N., Feridunoglub, C., 2003. Dominant rock properties affecting the penetration rate of percussive drills, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 40, str. 711–723.

Kralj, V., 1982. Osnove rudarstva. RSIZ, Zagreb.

Kujundžić, T., 2006. Bušenje, Interna skripta, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb.

Mishra, D.A., Basu, A., 2013 Estimation of uniaxial compressive strength of rock materials by index tests using regression analysis and fuzzy inference system, Department of Geology & Geophysics, Indian Institute of Technology Kharagpur, India.

Stack, B., 1982. Handbook of mining and tunnelling machinery, Wiley, New York

Shalabi, F. I., Cording, E. J., Al-Hattamleh, O. H., 2006. Estimation of rock engineering properties using hardness tests, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois.

Sandvik, 2010. Operator's Manual, URL: http://mining.sandvik.com/en/products/tools/bench-drilling-dth (13. lipnja 2015).

Živković, S., Galić, I., 2010. Rudarski strojevi, interna skripta, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb.