



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ-ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΕΞΑΜΗΝΟ 1^ο

Φυσική των εκρηκτικών μηχανισμών

Ειρήνη Γεωργοπούλου
mm20073

Γενικές πληροφορίες

Για την εξόρυξη πετρωμάτων είναι απαραίτητη η άσκηση κατάλληλων δυνάμεων.

Η εξόρυξη γίνεται με κυρίως δύο τρόπους:

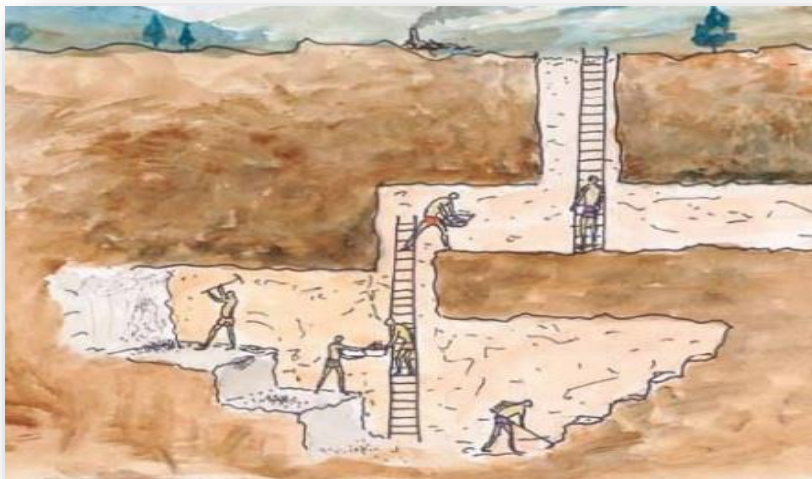
1. Με την άσκηση δυνάμεων
2. Με την χρήση εκρηκτικών



Ιστορική αναδρομή

17^{ος} αιώνας

- Μηχανικά μέσα
- Χειρωνακτική δύναμη



18^{ος} -19^{ος} αιώνας

- Νιτρογλυκερίνη
- δυναμίτιδα
- γομμοδυναμίτιδα



Σημαντικές ήταν οι ανακάλυψεις του Νόμπελ, όπως της δυναμίτιδας.

Σήμερα

- Γίνεται εκτενής χρήση εκρηκτικών για την εξόρυξη πετρωμάτων.

Θεωρητικό μέρος

Όταν πραγματοποιείται μια έκρηξη, υπάρχει συμβολή χημικής ενέργειας.

Χημική ενέργεια



Μηχανική ενέργεια



Κρουστικό κύμα και της υψηλή πίεση → **τάσεις** στο πέτρωμα

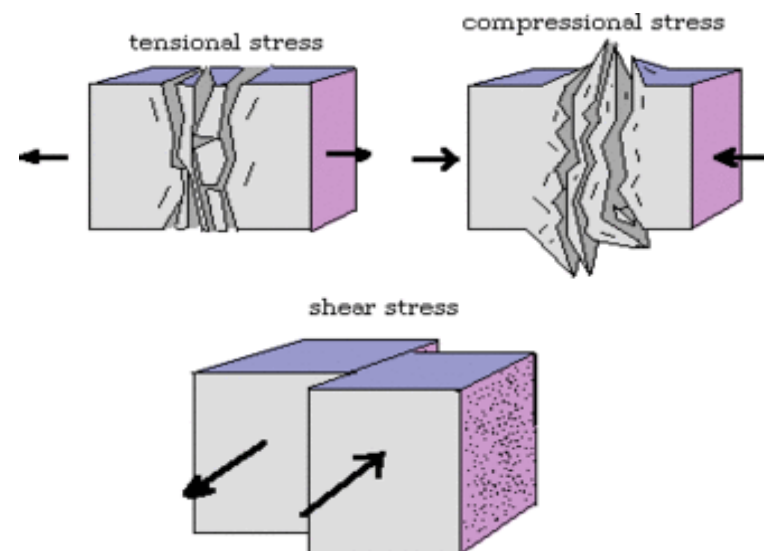
Ειδική κατανάλωση ενέργειας εξόρυξης

- Απαιτείται για παραγωγή μονάδας όγκου
- Δεν είναι εσωτερική ιδιότητα πετρώματος

Ανατίναξη → δημιουργία αέριου ωστικού κύματος

Τάση: η δύναμη που ασκείται ανά μονάδα επιφάνειας της διατομής

$$\sigma_{avg} = \frac{F_N}{A}$$



Ταχύτητα έκρηξης

Ταχύτητα έκρηξης: ρυθμός
έκλυσης ενέργειας εκρηκτικού

Παράμετροι

- Τρόπος έναυσης
- Πυκνότητα γόμωσης
- Διάμετρος εκρηκτικής στήλης
- Βαθμός περιορισμού

μεγαλύτερη **διάμετρος** της εκρηκτικής στήλης →
μεγαλύτερη είναι η **ταχύτητα έκρηξης**
μεγαλύτερος είναι ο **βαθμός περιορισμού** →
μεγαλύτερη είναι η **ταχύτητα της έκρηξης**

πίεση της έκρηξης (P_D)

$$P_D = \frac{1}{\gamma + 1} \rho_0 D^2$$

ακουστική ταχύτητα (c_D)

$$C_D = \frac{\gamma}{\gamma + 1} D$$

Όπου D είναι η ταχύτητα έκρηξης, γ ο
αδιαβατικός συντελεστής της έκρηξης και ρ_0
η πυκνότητα του εκρηκτικού

Εκλυόμενη ενέργεια



Δοκιμές κάτω από το νερό

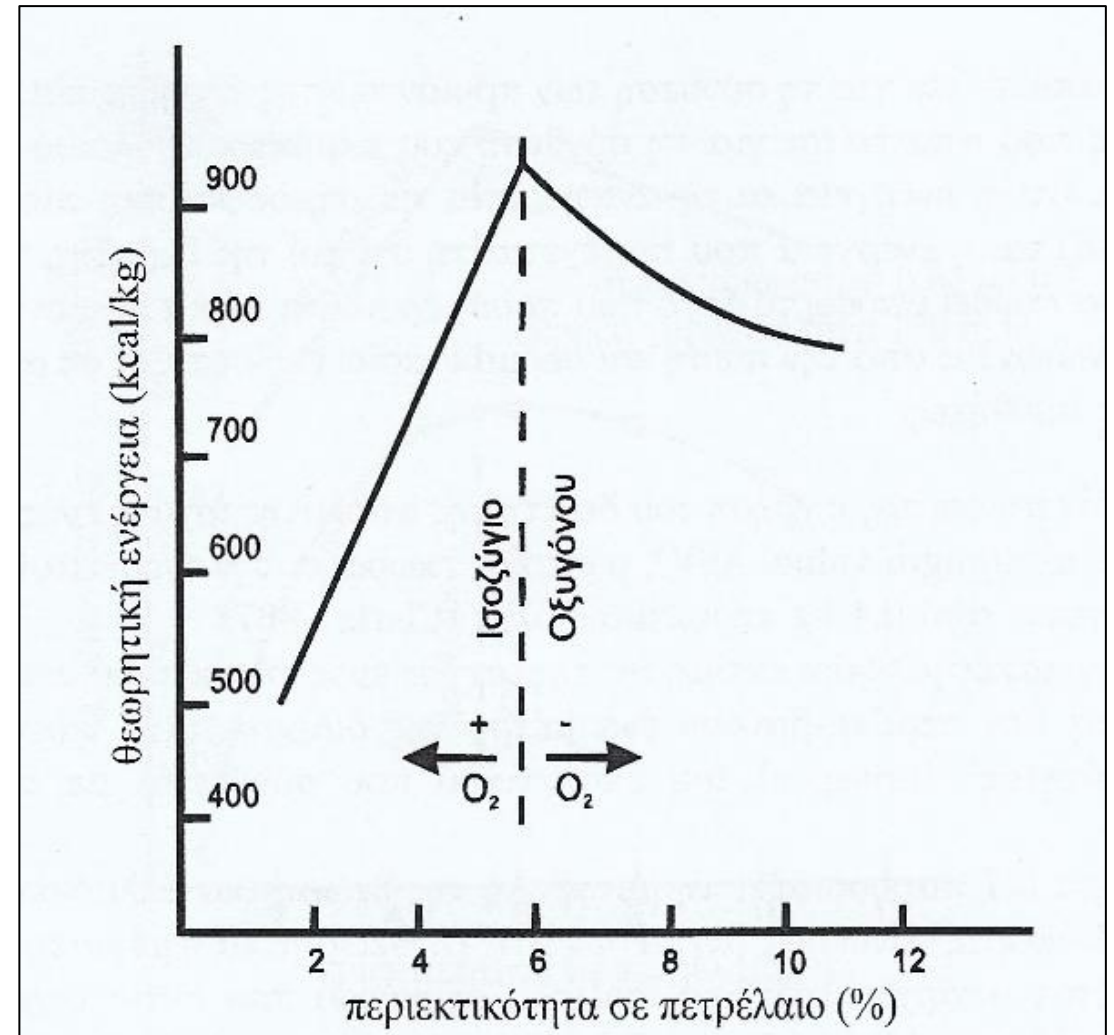
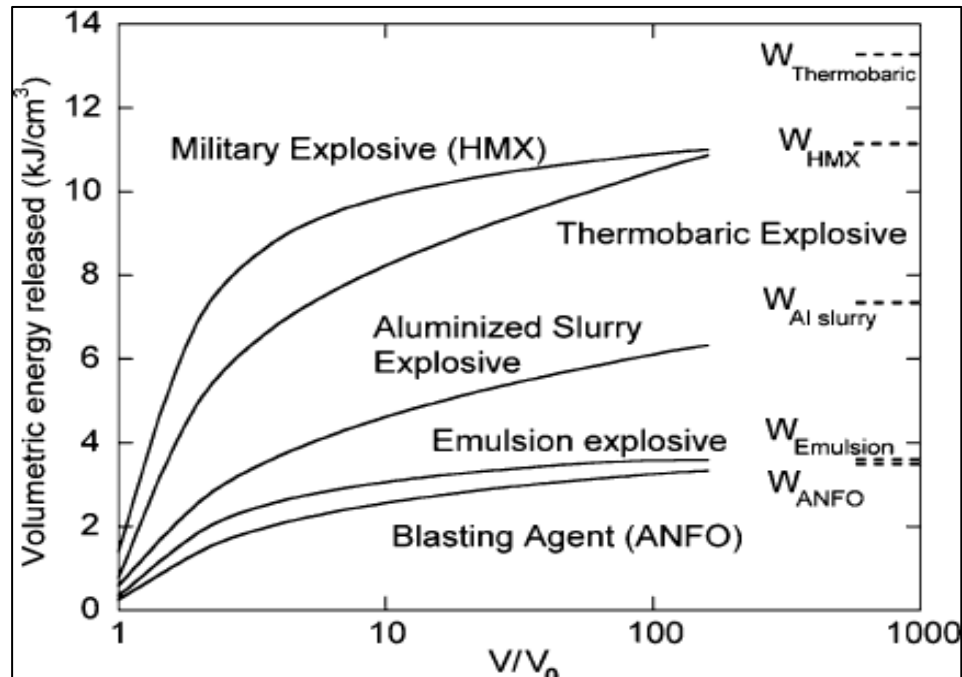
- η κρουστική ενέργεια είναι μέτρο της διαρρηκτικής ικανότητας ενός εκρηκτικού υλικού
- ενέργεια ώθησης είναι το μέτρο της ικανότητας του εκρηκτικού να μετακινήσει του θραυσμένου υλικού

Θεωρητικά εκλυόμενη ενέργεια

- η διαφορά μεταξύ της ενέργειας για τη σύνθεση των προϊόντων της έκρηξης και της ενέργειας για την σύνθεση του εκρηκτικού
- αναφέρεται στην ατμοσφαιρική πίεση

Δείκτης της απόλυτης ισχύος ενός εκρηκτικού: ενέργεια σε Joule που παράγεται από 0.1 kg εκρηκτικού

Οι ενεργειακές μέθοδοι εκτίμησης της ισχύος του εκρηκτικού δεν περιλαμβάνουν ένα μέτρο διαρρηκτικής ικανότητας ή “θραυστικότητας” του εκρηκτικού



Σχήμα 1: Μεταβολή της θεωρητικά εκλυόμενης ενέργειας του ANFO με την σύνθεση εκρηκτικού μίγματος

Πίεση έκρηξης

Πίεση του κρουστικού κύματος που προηγείται από τη ζώνη χημικής αντίδρασης

Εξίσωση Brown (1956):

$$P = 4.18 \times 10^{-7} C^2 \frac{\rho}{1 + 0.80\rho}$$

Όπου: P: η πίεση έκρηξης σε kbar.
ρ: η πυκνότητα σε g/cm³.
C: ταχύτητα έκρηξης σε ft/s.

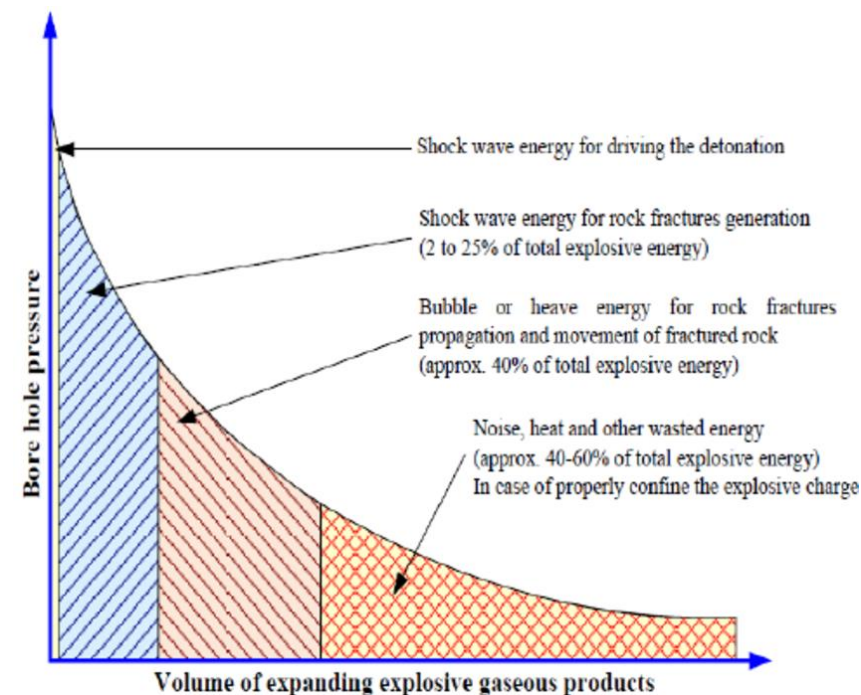
Εξίσωση DuPont

$$P = 2.5 \times 10^{-6} \rho D^2$$

Όπου: ρ= πυκνότητα σε g/cm³.
D= ταχύτητα έκρηξης σε m/s.
P= πίεση έκρηξης σε kbar.

Εξίσωση κατά Atlas

$$P = 2.325 \times 10^{-7} \rho C^2$$



Διάδοση και απόσβεση κρουστικού κύματος

Παράμετροι γεωμετρίας
διάδοσης του παλμού

θέση του σημείου
έναυσης

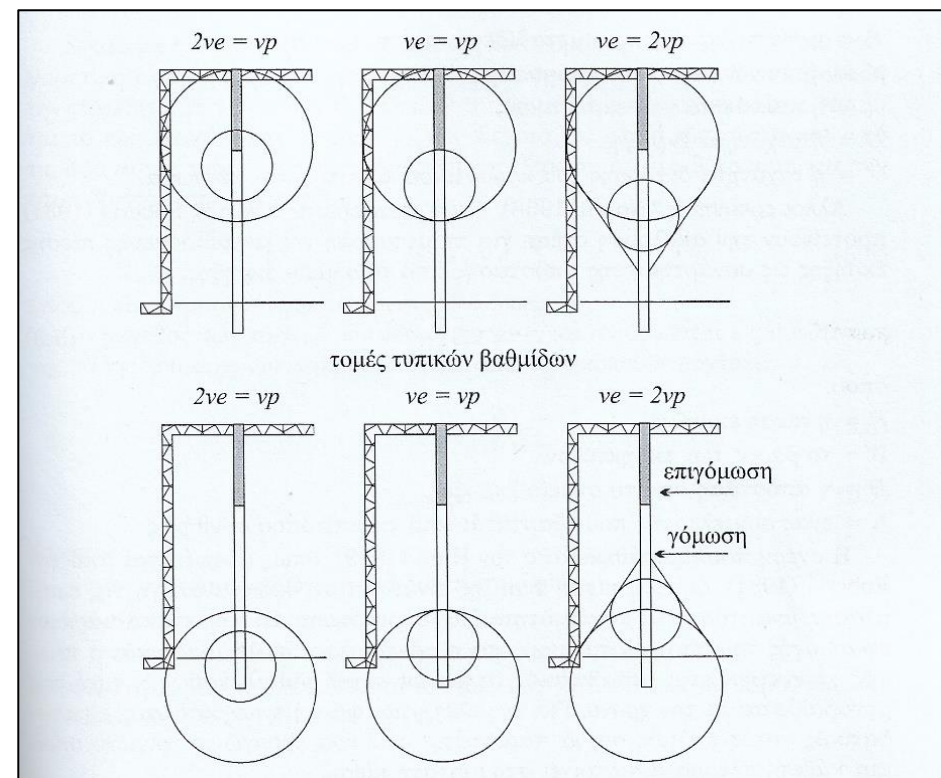
ταχύτητα έκρηξης,

ταχύτητα διάδοσης
ελαστικών κυμάτων
στο πέτρωμα

γεωμετρία της
εκρηκτικής στήλης

Μήκος της εκρηκτικής
στήλης: διάμετρος 6:1 →
σφαιρικό μέτωπο του
κύματος

Αντίθετα, μέτωπο κύματος
κυλινδρικό



Σχήμα 3: Μορφές κρουστικού παλμού ανάλογα με τις ταχύτητες των μέσων (v_e, v_p) και τη θέση έναυσης.

$P_{\max}$ εξαρτάται από τον διαθέσιμο χώρο για την αρχική εκτόνωση των θερμών αερίων προϊόντων

Συντελεστής της γόμωσης: το ποσοστό του διατρήματος που γομώνεται

Μεγαλύτερος συντελεστής λιγότερος είναι ο κενός χώρος και η πίεση των αερίων που δέχεται το πέτρωμα είναι μεγαλύτερη.

Σταδιακή εκτόνωση των αερίων κατά την ωστική φάση.

Πίεση

Τύπος σύμφωνα με τον Roberts

$$P_t = \frac{2C\rho P_d}{D\rho_e + C\rho}$$

Όπου: P_d : η πίεση έκρηξης,

P_t : η πίεση έκρηξης που μεταδίδεται στο πέτρωμα,

ρ : η πυκνότητα του πετρώματος,

ρ_e : η πυκνότητα του εκτηκρικού,

D : η ταχύτητα έκρηξης,

C : η ταχύτητα διάδοσης του κρουστικού κύματος στο πέτρωμα.

Τύπος σύμφωνα με τον Noren

$$P = 2.3 \frac{K}{D} \cdot \sqrt[3]{W}$$

Όπου: P : η πίεση έκρηξης,

W : το βάρος των εκρηκτικών,

D : η απόσταση από το σημείο έκρηξης,

K : ένας συντελεστής που εξαρτάται από τις συνθήκες που επικρατούν τη στιγμή εκείνη.

Μηχανική διάτρηση

1. εφαρμογή τάσεων για λύση συνοχής του υλικού
2. διαδικασίες κρούσης, διάβρωσης, διείσδυσης

Στάδια

- ☐ Την παραγωγή μηχανικής ενέργειας
- ☐ Τη μεταφορά της μηχανικής ενέργειας
- ☐ Τη μεταφορά ενέργειας από το κοπτικό άκρο στο πέτρωμα
- ☐ Την σύλληξη των θρυμμάτων και σύγχρονη ψύξη και λίπανση των διαφόρων μηχανισμών

Κρουστική διάτρηση

διαδοχικές κρούσεις υψηλής ενέργειας και υψηλής συχνότητας και μεταφέρονται από τα κοπτικά άκρα στο πέτρωμα

- ☐ Τα εξωδιατρηματικά: κρουστικός παλμός παράγεται έξω από το διάτρημα και μεταφέρεται στο κρουστικό άκρο
- ☐ Τα ενδοδιατρηματικά: κρουστικός παλμός παράγεται κοντά στο κοπτικό άκρο και μέσα στο διάτρημα.

Εφαρμογές

1. Εξόρυξη πετρωμάτων



Σύμφωνα με το Κ.Μ.Λ.Ε οι εκρηκτικοί μηχανισμοί χρησιμοποιούνται για επαγγελματικές ανάγκες στο χώρο των μεταλλείων, των λατομίων και γενικά παρόμοιων επιχειρήσεων.

2. Η δημιουργία ανοιχτού χώρου για την δημιουργία σηράγγων και οδών.

- Χρησιμοποιούνται και για να ανοιξεί ένας δρόμος που λόγω κατολισθήσεων έμεινε κλειστός.



Εικόνες: παλιά οδός Κοζάνης-Ιωαννίνων που είναι κλειστή λόγω κατολισθήσεων και χρησιμοποιήθηκαν εκρηκτικοί μηχανισμοί για να θριμματιστούν τα πετρώματα και να ξανα λειτουργήσει

- Για την δημιουργία της Αττικής οδού – για την διάνοιξη σηράγγων- χρησιμοποιήθηκαν οι μέθοδοι NATM(Drill and Blast)



Σήραγγες ΑΣ1, ΑΣ2 & ΑΣ3 ΠΑΘΕ, Τμήμα Κακιά Σκάλα



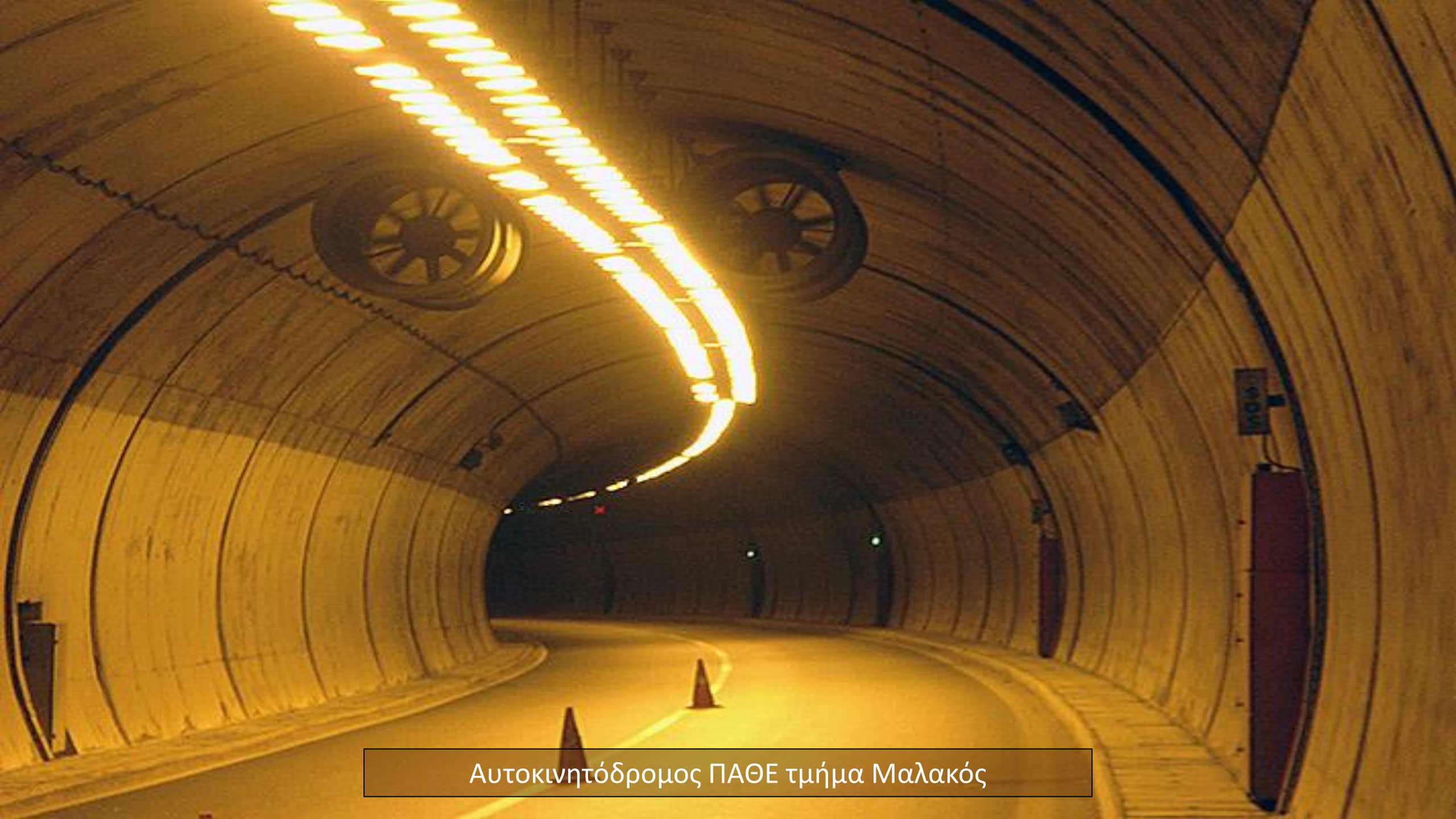
Σήραγγα ΑΣ1(Γεράνεια)



Σήραγγα ΑΣ2 (Ευπάλινος)

- Σήραγγα Παναγοπούλας





Αυτοκινητόδρομος ΠΑΘΕ τμήμα Μαλακός

Σήραγγα Τεμπών





Στο εξωτερικό, όπως για παράδειγμα στον Καναδά, χρησιμοποιείται η μέθοδος Drill and Blast η οποία είναι μια διαδομένη μέθοδος που χρησιμοποιείται για να σπάει τα πετρώματα.

Χρήση αλλά και φύλαξη των εκρηκτικών μηχανισμών με προσοχή.

- Φύλαξη σε ειδικές αποθήκες
- Μεταφορά με μεγάλη προσοχή στους χώρους που θα χρησιμοποιηθούν από οχήματα που θα περιέχουν την σήμανση ότι μεταφέρουν τέτοιου είδους υλικά.

ΕΠΙΤΡΕΠΟΜΕΝΕΣ ΠΟΣΟΤΗΤΕΣ ΕΚΡΗΚΤΙΚΩΝ ΥΛΩΝ ΑΝΑ ΤΥΠΟ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΕΚΡΗΚΤΙΚΩΝ	ΠΟΣΟΤΗΤΑ (kg) / ΤΥΠΟ ΟΧΗΜΑΤΟΣ		
	ΤΥΠΟΣ I	ΤΥΠΟΣ II	ΤΥΠΟΣ III
I.1	50	1000	15.000
I.2	50	3000	15.000
I.3	50	5000	15.000
I.4	300	15.000	15.000
I.5	50	5000	15.000
I.6	50	5000	15.000

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα συνήθη επιβλαβή αέρια από εκρήξεις στα υπόγεια έργα:

ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΑΕΡΙΟΥ	ΣΧΕΤΙΚΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ	ΚΙΝΔΥΝΟΙ	TLVs		
			TWA	STEL	PEAK
ΜΟΝΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ (CO)	0,97	ΤΟΞΙΚΟ	50 ^(*)	300 ^(*)	400 ^(*)
ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ (CO ₂)	1,53	ΑΣΦΥΚΤΙΚΟ ΤΟΞΙΚΟ	5.000	5.000	-
ΜΟΝΟΞΕΙΔΙΟ ΑΖΩΤΟΥ (NO)	1,04	ΤΟΞΙΚΟ	25	-	-
ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΑΖΩΤΟΥ (NO ₂)	1,60	ΠΟΛΥ ΤΟΤΙΚΟ	5	5	10

Όπου: TLVs: Οριακές τιμές έκθεσης
TWA: Χρονικά σταθμευμένη μέση τιμή.
STEL : Οριακή τιμή έκθεσης μικρής διάρκειας.

Μελλοντική εξέλιξη

Αναφορικά με την μελλοντική εξέλιξη, δημιουργούνται και νέοι τρόποι για σπάσιμο των πετρωμάτων όπως είναι το Royex το οποίο είναι ένα σύστημα που δίνει την δυνατότητα της προσέγγισης της ανατίναξης του υπόεδάφους και την εξόρυξη μεταλλευμάτων.



Οι φωτογραφίες δείχνουν θραυσμένα κομμάτια μεγέθη μεταξύ 200-400 mm τα οποία είναι δεκτά από τον καταναλωτή.

Συμπεράσματα

→ Στη συγκεκριμένη εργασία, αναφέρθηκε ο τρόπος λειτουργίας των εκρηκτικών, αλλά και οι φυσικοί νόμοι που τον διέπουν.



→ Ακόμη, έγινε κατανοητή η χρήση τους τόσο στην μεταλλευτική όσο και στην κατασκευή έργων.

Σας ευχαριστώ πολύ!