

Ακαδημαϊκό
έτος 2020-2021



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΦΥΣΙΚΗ Ι

ΦΥΣΙΚΗ ΤΩΝ ΕΚΡΗΚΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ

Ονοματεπώνυμο : Ειρήνη Γεωργοπούλου

Αριθμός μητρώου : mm20073

Υπεύθυνος καθηγητής:κ.Γ.Τσιγαρίδας

Περιεχόμενα

Περίληψη	2
Εισαγωγή.....	3
Γενικές πληροφορίες-Βασικές εφαρμογές.....	3
Ιστορική αναδρομή.....	3
Θεωρητικό μέρος	4
Ταχύτητα έκρηξης	5
Εκλυόμενη ενέργεια	5
Πίεση έκρηξης.....	6
Πίεση που αναπτύσσεται στα τοιχώματα του διατρήματος	7
Ευαισθησία σε τριβή	8
Ζώνες θρυμματισμού στη κρουστική φάση	8
Διάδοση και απόσβεση κρουστικού κύματος	9
Ανάκλαση και διάθλαση κρουστικού παλμού.....	11
Πρόσπτωση του κρουστικού κύματος σε ελεύθερη επιφάνεια	12
Πρόσπτωση του κρουστικού κύματος σε ανοικτή ρωγμή	13
Ωστική φάση.....	14
Έκρηξη και ανάφλεξη	15
Αρχές της διεύθυνσης στα πετρώματα.....	15
Εφαρμογές	17
Μελλοντική εξέλιξη.....	22
Συμπέρασμα.....	22
Βιβλιογραφία	23

Περίληψη

Η παρούσα εργασία με θέμα «Φυσική των Εκρηκτικών Μηχανισμών» για το μάθημα ΦΥΣΙΚΗ Ι της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών του Ε.Μ.Π., πραγματεύεται το κομμάτι των εκρηκτικών υλών που χρησιμοποιούνται σε διεργασίες εξόρυξης πετρωμάτων σε ανοιχτά μέτωπα, και εφαρμογές σε υπόγειες ανατινάξεις. Αρχικά, γίνεται αναφορά σε γενικές πληροφορίες και ιστορική αναδρομή των εκρηκτικών μηχανισμών, έπειτα παρουσιάζονται παράμετροι ταχύτητα έκρηξης, πίεση, ενέργεια που εκλύεται, και μηχανισμοί διάδοσης κυμάτων και του κρουστικού παλμού. Τέλος, έγινε ανάλυση εφαρμογών και μελλοντικών εξελίξεων των μεθόδων εξόρυξης πετρωμάτων με εκρηκτικές ύλες.

Εισαγωγή

Γενικές πληροφορίες-Βασικές εφαρμογές

Καθημερινά, για να επιτευχθεί η διαδικασία της εξόρυξης ενός μέρους πετρώματος ή εδάφους, είναι απαραίτητο να προκληθούν σωστού τύπου(π.χ. εφελκυστική¹, θλιπτική², διατμητική³) και μεγέθους δυνάμεις. Γενικά, όταν ασκηθούν μηχανικές δυνάμεις είτε προσφέρεται ενέργεια στο πέτρωμα, είτε καταναλώνεται μέσω της διαδικασίας της εξόρυξης. Η απόρροια της φόρτισης του υλικού είναι η θράυση του και η πραγμάτωση της απαιτούμενης δραστηριότητας.

Η εξόρυξη φυσικών υλικών γίνεται με δύο κυρίως τρόπους:

- ☐ με την άσκηση δυνάμεων(θερμικών ,μηχανικών) , συνεπώς δίχως τη χρήση εκρηκτικών υλικών,
- ☐ με την χρήση εκρηκτικών υλών, άρα με την δυναμική φόρτωση και θράυση των υλικών. ^[1]

Ιστορική αναδρομή

Από ιστορικής πλευράς, μέχρι τις πρώτες στιγμές του 17^{ου} αιώνα, η εξόρυξη πετρωμάτων γινόταν μόνο με την αξιοποίηση μηχανικών μέσων, όπως τα ατομικά εργαλεία (σκαπάνη, κοπίδι, κτλ). Έτσι, οι εργάτες μέσω της χειρωνακτικής τους δύναμης επιδιώκαν να υλοποιήσουν την δραστηριότητα αυτή.

Τον Φεβρουάριο του 1627, στα Βασιλικά Μεταλλεία του Schemintz στην Ουγγαρία επιδιώχθηκε η πρώτη εξόρυξη με την χρήση εκρηκτικών υλικών (μαύρη πυρίτιδα, υλικό που μέχρι τότε χρησιμοποιούταν από τις Ευρωπαϊκές χώρες για πολεμικό μέσο).

Τους επόμενους αιώνες (19^{ος} -20^{ος}), ανακαλύφθηκαν και άλλα εκρηκτικά υλικά όπως η νιτρογλυκερίνη, η δυναμίτιδα και η γομμοδυναμίτιδα. Η δεύτερη ήταν μάλιστα πολύ πιο ισχυρή από τις προηγούμενες ύλες. Καθοριστικό ρόλο διαδραμάτισαν οι ανακαλύψεις του Alfred Nobel, ο οποίος προσέφερε αρκετές νέες εκρηκτικές ύλες στον τομέα της χημείας. Ο ίδιος κατασκεύασε το πρώτο καψύλλιο το οποίο έπειτα από πολλά πειράματα εξελίχθηκε και βελτιώθηκε. Ήδη, μετά τον 19^ο αιώνα η χρήση εκρηκτικών στην εξόρυξη ήταν μια ασφαλής και

¹ Εφελκυσμός ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο σε ένα σώμα ασκούνται δυνάμεις αντίθετης φοράς που έχουν την τάση να το επιμηκύνουν.

² Θλίψη ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο σε ένα σώμα ασκούνται δυνάμεις αντίθετης φοράς που έχουν την τάση να το συμπιέσουν.

³ Διάτμηση ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο όταν ασκηθούν κάθετα δύο ίσες και αντίθετες δυνάμεις στον άξονα ενός σώματος, αυτό παραμορφώνεται.

οικονομική μέθοδος. Μάλιστα, μετά το 1950 ήταν δυνατή η χρήση διαφόρων θερμοχημικών και θερμοδυναμικών θεωριών, οι οποίες υπολογίζουν τις διάφορες παραμέτρους των εκρήξεων, και έτσι ήταν εφικτή η επιλογή του σωστού τύπου εκρηκτικής ύλης που είναι απαραίτητη για τον απαιτούμενο θρυμματισμό του πετρώματος, σε συνδυασμό με τις συνθήκες της εξόρυξης.

Το 1956, έγινε για πρώτη φορά χρήση του ANFO (νιτρικό αμμώνιο) σε μεταλλείο της Αμερικής. Έκτοτε, αυτό έγινε πιο διαδεδομένο για αυτές τις δραστηριότητες από τους δυναμίτες και τα άλλα εκρηκτικά.

Σήμερα, γίνεται εκτενής χρήση εκρηκτικών υλών - και παραγώγων τους - για την εξόρυξη πετρωμάτων. ^[1,2]

Θεωρητικό μέρος

Η διαδικασία της εξόρυξης πραγματοποιείται σε χώρους που ονομάζονται μέτωπα και απαιτούνται οι εκρηκτικές ύλες όταν το πέτρωμα έχει μικρή αντοχή αλλά είναι συμπαγές. Κατά την διάρκεια της χρησιμοποιούνται εκρηκτικές ύλες. Έτσι, μέσω της συμβολής της χημικής τους ενέργειας, παρέχεται η ενέργεια για τον τεμαχισμό και την αποκόλληση του πετρώματος από την θέση στην οποία βρίσκεται. Μάλιστα, κατά την διάρκεια της έκρηξης γίνεται μετατροπή της χημικής ενέργειας των εκρηκτικών σε μηχανική και υπό τη μορφή του κρουστικού κύματος⁴ και της υψηλής πίεσης ασκεί τάσεις⁵ στη μάζα του πετρώματος. Μεγάλα ποσά ενέργειας απελευθερώνονται μέσα σε μικρό χρονικό διάστημα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, κατά τη διάρκεια της διαδικασίας η χημική ενέργεια να μετατρέπεται σε μηχανική. Γενικά, όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα της έκρηξης τόσο περισσότερες ρωγμές δημιουργούνται στο πέτρωμα.

Ειδική κατανάλωση ενέργειας εξόρυξης ονομάζουμε την ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή μίας μονάδας όγκου εξορυγμένου πετρώματος και δεν είναι εσωτερική ιδιότητα του πετρώματος. Η ειδική κατανάλωση ενέργειας εξαρτάται από το επιθυμητό μέγεθος των τεμαχιδίων του πετρώματος, ανεξαρτήτως της μεθόδου εξόρυξης. ^[3]

Κατά τη διάρκεια της ανατίναξης δημιουργείται επίσης και αέριο ωστικό κύμα,

⁴ Το κρουστικό κύμα αποτελεί ένα δυνατό πιεστικό κύμα το οποίο βρίσκεται σε κάθε ελαστικό μέσο όπως το νερό, στον αέρα ή σε κάθε στερεή επιφάνεια. Δημιουργείτε από κεραυνούς, ή άλλα φαινόμενα που προκαλούν βίαιη πίεση. Αυτά τα κύματα μεταδίδονται γρήγορα. ^[4]

⁵ Τάση στη μηχανική ορίζεται η δύναμη που ασκείται ανά μονάδα επιφάνειας της διατομής, δηλαδή:

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

^[5]

κύμα πίεσης του ατμοσφαιρικού αέρα. Αυτό διαδίδεται στην ατμόσφαιρα ακτινικά στον χώρο της ανατίναξης.

Ταχύτητα έκρηξης

Η ταχύτητα έκρηξης δηλώνει τον ρυθμό με τον οποίον εκλύεται η ενέργεια του εκρηκτικού. Είναι δηλαδή η ταχύτητα με την οποία κινείται ο κρουστικός παλμός (κύμα) ο οποίος δημιουργείται κατά την διαδικασία της έκρηξης και δηλαδή η ταχύτητα της χημικής αντίδρασης.

Αυτή, εξαρτάται από το τρόπο έναυσης του εκρηκτικού, την πυκνότητα γόμωσης, τη διάμετρο της εκρηκτικής στήλης⁶ και το βαθμό περιορισμού⁷.

Έτσι, έχουμε για την πίεση της έκρηξης (P_D) και την ακουστική ταχύτητα (c_D) τους παρακάτω τύπους:

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

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

Όπου D είναι η ταχύτητα έκρηξης, γ ο αδιαβατικός συντελεστής της έκρηξης και ρ_0 η πυκνότητα του εκρηκτικού.^[1]

Εκλυόμενη ενέργεια

Όπως αναφέρθηκε και πριν, η ενέργεια που ελευθερώνεται κατά τη διάρκεια μιας έκρηξης σχετίζεται αφενός με την χημική σύνθεση του υλικού, αφετέρου με τις αντιδράσεις που πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας. Γενικότερα, η ενέργεια που εκλύεται κατά τη διάρκεια της έκρηξης προσδιορίζεται με τους ακόλουθους δύο τρόπους:

- Δοκιμές κάτω από νερό: Οι δοκιμές αυτές στηρίζονται στο δεδομένο ότι η κρουστική ενέργεια που ελευθερώνεται από την διαδικασία της έκρηξης που γίνεται κάτω από το νερό είναι μέτρο της διαρρηκτικής ικανότητας ενός εκρηκτικού υλικού. Αντίστοιχα, ενέργεια ώθησης είναι το μέτρο της ικανότητας του εκρηκτικού να μετακινήσει και να αλλάξει θέση στο

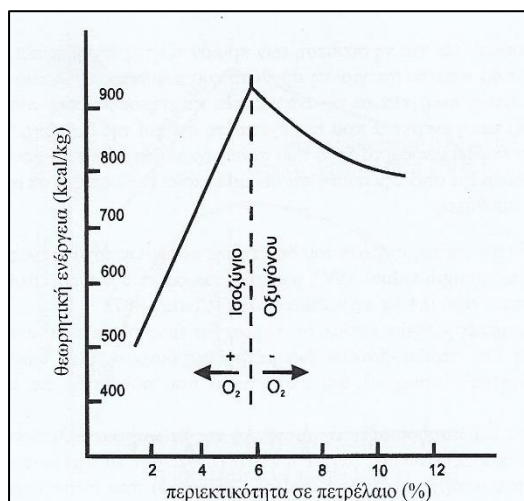
⁶ Γενικά ισχύει ότι όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος της εκρηκτικής στήλης τόσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα έκρηξης.

⁷ Αναφέρεται στο πόσο περιορισμένη είναι μια ποσότητα εκρηκτικού από πλευρικές πιέσεις και σχετίζεται έμμεσα με την πυκνότητα του. Όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός περιορισμού ενός εκρηκτικού τόσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα της έκρηξης.

θραυσμένο υλικό. Σε αυτή τη περίπτωση υπολογίζουμε την κρουστική ενέργεια κατασκευάζοντας ένα διάγραμμα πίεσης-τετραγώνου του χρόνου που μετريέται σε δεδομένη απόσταση από το σημείο έκρηξης. Ακόμη, η ενέργεια ώθησης υπολογίζεται από τον χρόνο που πέρασε μέχρι την πρώτη υποχώρηση της φουσαλίδας που δημιουργείται κατά τη δοκιμή.

- Θεωρητικά εκλυόμενη ενέργεια: Είναι η διαφορά μεταξύ της ενέργειας που απαιτείται για τη σύνθεση των προϊόντων της έκρηξης και της ενέργειας που απαιτείται για την σύνθεση του εκρηκτικού υλικού. Αυτή η ενέργεια αναφέρεται στην ατμοσφαιρική πίεση, διότι για να υπολογιστεί η ενέργεια που παρέχεται τη στιγμή της έκρηξης πρέπει να ληφθούν υπόψιν το έργο που προσφέρουν τα αέρια προϊόντα καθώς αυτά εκτονώνονται από τη πίεση και θερμοκρασία της έκρηξης σε ατμοσφαιρικές συνθήκες.

Επιπροσθέτως, ο δείκτης της απόλυτης ισχύος ενός εκρηκτικού εκφράζει την ενέργεια σε Joule που παράγεται από 0.1 kg εκρηκτικού που συνδέεται με την πίεση έκρηξης. Σημειώνεται τέλος ότι οι ενεργειακές μέθοδοι εκτίμησης της ισχύος του εκρηκτικού μειονεκτούν κατά το ότι δεν περιλαμβάνουν ένα μέτρο διαρρηκτικής ικανότητας ή “θραυστικότητας” του εκρηκτικού που συνδέεται με την πίεση της έκρηξης.



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

Το σχήμα 1 παρουσιάζει την μεταβολή της θεωρητικά εκλυόμενης ενέργειας για διάφορες συνθέσεις μιγμάτων ANFO. Με βάση τη θεωρία η μέγιστη ενέργεια εκλύεται όταν υπάρχει μηδενικό ισοζύγιο οξυγόνου που αυτό αναφέρεται σε ποσοστιαία αναλογία AN:94.5% και FO:5.5%. Από πρακτική πλευρά, είναι καλύτερο κατά την προετοιμασία του μίγματος εκρηκτικών να προστίθεται μεγαλύτερη ποσότητα καυσίμου, διότι ο ρυθμός ελάττωσης της ενέργειας είναι μεγαλύτερος στα μίγματα με αρνητικό ισοζύγιο οξυγόνου. ^[1]

Πίεση έκρηξης

Είναι η πίεση του κρουστικού κύματος που προηγείται από τη ζώνη χημικής αντίδρασης. Αυτή είναι συνάρτηση της πυκνότητας του εκρηκτικού (ρ), της ταχύτητας έκρηξης (C) και της μοριακής ταχύτητας του υλικού. Στα συμπυκνωμένα εκρηκτικά η μοριακή ταχύτητα είναι περίπου το $\frac{1}{4}$ της ταχύτητας έκρηξης. Έτσι ο τύπος της πίεσης δίνεται από την 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.

Ακόμη από την εξίσωση του DuPont δίνεται:

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

Όπου: ρ = πυκνότητα σε g/cm³.

D= ταχύτητα έκρηξης σε m/s.

P= πίεση έκρηξης σε kbar.

Επίσης, από την εξίσωση κατά Atlas:

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

Πίεση που αναπτύσσεται στα τοιχώματα του διατρήματος

Η πίεση της έκρηξης και η πίεση που αναπτύσσεται στα τοιχώματα του διατρήματος αποτελούν διαφορετικές πιέσεις. Η δεύτερη είναι μικρότερη της πίεσης έκρηξης και είναι συνάρτηση του βαθμού περιορισμού του υλικού και της θερμοκρασίας των αερίων.

Έτσι σύμφωνα με την παρακάτω σχέση υπολογίζεται:

$$P_b = 1.69 \times 10^{-3} \rho C^2 \left[\sqrt{c} \frac{d_e}{d_h} \right]^{2.6}$$

Όπου: P_b: η πίεση στο διάτρημα.

ρ : η πυκνότητα του εκρηκτικού (g/cm³).

C: η ταχύτητα της έκρηξης (ft/s).

c: το ποσοστό του διατρήματος που γομώθηκε (%).

d_e: η διάμετρος του εκρηκτικού (in).

d_h: η διάμετρος του εκρηκτικού (in).

Η πίεση στο διάτρημα κυμαίνεται από 10 έως 60 kbar (Hartman 1987) και καθορίζει την ικανότητα της εκρηκτικής ύλης να θρυμματιστεί χαμηλής

συνεκτικότητας/αντοχής (χαλαρά) πετρώματα, καθώς και να μετατοπίσει το θραυστικό πέτρωμα.

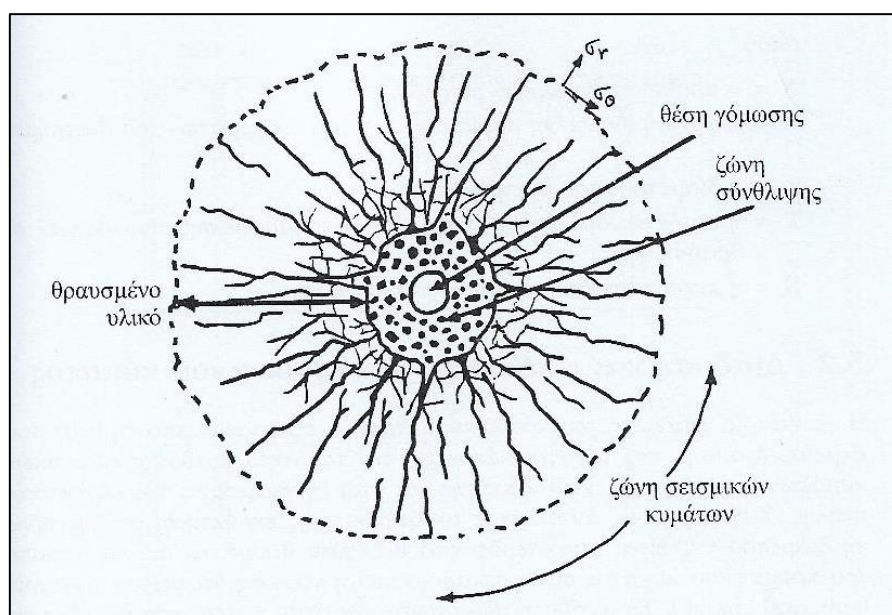
Ευαισθησία σε τριβή

Τα εκρηκτικά υλικά συχνά έρχονται σε επαφή σε επιφάνειες και έτσι δημιουργείται ουσιαστικά μια τριβή ανάμεσα σε αυτά. Η τριβή αυτή, είναι δυνατό να προκαλέσει την έναυση του εκρηκτικού κάτω από συγκεκριμένες κατασταστάσεις-συνθήκες. Γενικά γνωρίζει κανείς ότι μεταξύ δύο επιφανειών δύο υλικών που βρίσκονται σε σχετική κίνηση ασκείται μία δύναμη τριβής κίνησης, η οποία είναι ανάλογη στη κάθετη δύναμη η οποία φέρει τα δύο σώματα σε επαφή και για να υπερνικηθεί η δύναμη αυτή είναι απαραίτητη προσφορά ενέργειας με την μορφή ως έργου είτε ως θερμότητας.

Όταν οι επιφάνειες που έρχονται σε επαφή δεν είναι λείες, η μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε θερμότητα γίνεται σε καθορισμένα σημεία τα οποία ονομάζονται θερμά σημεία. Αυτά είναι που δημιουργούν την έναυση της χημικής αντίδρασης έκρηξης. ^[1]

Ζώνες θρυμματισμού στη κρουστική φάση

Όταν πραγματοποιηθεί μια έκρηξη σε συγκεκριμένη περιοχή τότε δημιουργούνται στο χώρο διάφορες ζώνες παραμόρφωσης οι οποίες είναι συμμετρικές ως προς σημείο ή άξονα. (σχήμα 2)



Σχήμα 2: Σχηματικό διάγραμμα ζωνών θρυμματισμού γύρω από διάτρημα

Αυτές οι ζώνες είναι οι εξής:

- *Ζώνη σύνθλιψης ή ρευστοδυναμική ζώνη:* Η μετάδοση και δημιουργία του κρουστικού κύματος έχει ως απόρροια την επιβολή μεγάλων ακτινικών και διατμητικών τάσεων στο πέτρωμα. Στη ζώνη αυτή καταναλώνεται μεγάλη ποσότητα της ενέργειας του κύματος.
- *Θρυμματισμένη ζώνη:* Καθώς η ακτινική θλιπτική τάση ελαττώνεται, στο πέτρωμα δημιουργούνται πυκνές ρωγμές. Στη ζώνη αυτή διακρίνονται δύο περιοχές: 1) η έντονα θρυμματισμένη και 2) η μέτρια θρυμματισμένη περιοχή.
- *Ελαστική ζώνη:* Η ζώνη αυτή εκτείνεται απεριόριστα και ξεκινά από το σημείο που η ακτινική συνιστώσα της τάσης του κρουστικού κύματος είναι μικρότερη από το δυναμικό όριο θραύσης του πετρώματος. Διακρίνεται σε δύο περιοχές: α) την ελάχιστη θρυμματισμένη και β) την μη θρυμματισμένη περιοχή. Στην πρώτη περίπτωση υπάρχει δημιουργία λίγων σε αριθμό ακτινικών ρωγμών, μεγάλου σχετικά μήκους. Στη δεύτερη το πέτρωμα κρίνεται ακέραιο.

Επιπροσθέτως έχει τεκμηριωθεί με υπολογισμούς και με πειραματική διαδικασίες ότι λιγότερο από το 20% της συνολικής ενέργειας του πετρώματος αναλλώνεται στην ελαστική ζώνη.

Έτσι σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο των Harries και Hengst υπολογίζεται ο αριθμός των βασικών ρωγμών.

$$N = \frac{Kb}{TR}$$

Όπου: N: αριθμός των κυρίων ρωγμών.

K: η αρχική ανηγμένη παραμόρφωση των τοιχωμάτων του διατρήματος.

b: η διάμετρος του διατρήματος.

T: η τιμή της δυναμικής ανηγμένης παραμόρφωσης που οδηγεί σε θραύση.

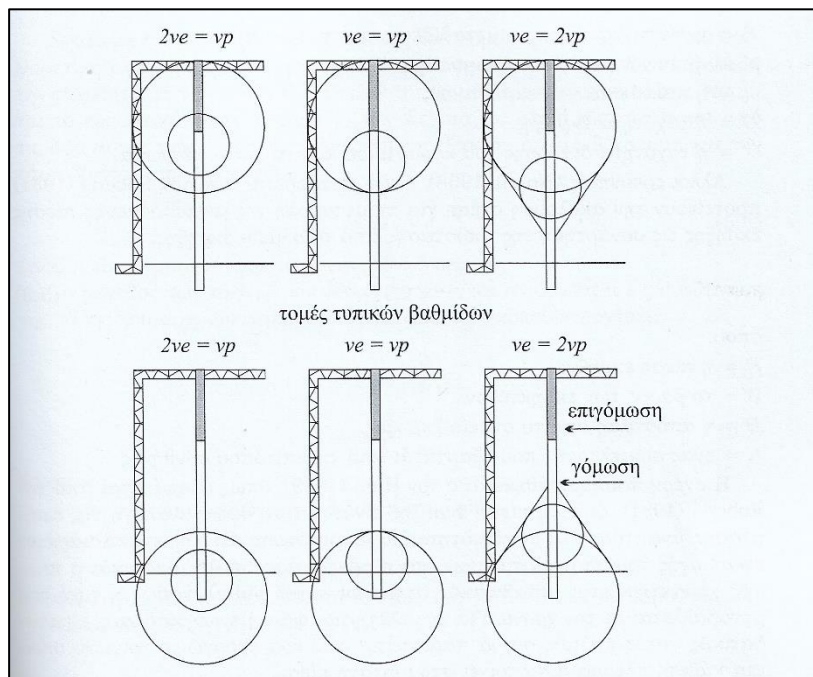
R: η απόσταση από το σημείο της έκρηξης.^[1]

Διάδοση και απόσβεση κρουστικού κύματος

Αρχικά, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η γεωμετρία διάδοσης του κρουστικού παλμού εξαρτάται από:

- τη θέση του σημείου έναυσης,
- την ταχύτητα έκρηξης,
- την ταχύτητα διάδοσης ελαστικών κυμάτων στο πέτρωμα
- τη γεωμετρία της εκρηκτικής στήλης.

Έτσι, εφόσον ο λόγος του μήκους της εκρηκτικής στήλης προς τη διάμετρο της είναι 6:1 τότε το μέτωπο του κρουστικού κύματος είναι σφαιρικό. Όταν ισχύει το αντίθετο και επιπλέον η ταχύτητα έκρηξης είναι μεγαλύτερη από τη ταχύτητα διάδοσης των ελαστικών κυμάτων τότε το μέτωπο του κρουστικού κύματος είναι κυλινδρικό. Το σχήμα 3 δείχνει τις διάφορες μορφές του κρουστικού παλμού ανάλογα με τη θέση πυροδότηση και τη σχέση της ταχύτητας v_e και της ταχύτητας του διαμήκους κύματος στο πέτρωμα v_p .



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

Η μεγαλύτερη πίεση που μπορεί να δεχτεί το κρουστικό κύμα εξαρτάται από τον διαθέσιμο χώρο για την αρχική εκτόνωση των θερμών αερίων προϊόντων της έκρηξης. Ο χώρος αυτός προσδιορίζεται από τον συντελεστή της γόμωσης ο οποίος εκφράζει το ποσοστό του διατρήματος που γομώνεται. Είναι δηλαδή ο λόγος του όγκου του εκρηκτικού προς τον όγκο του διατρήματος. Όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής αυτός, τόσο λιγότερος είναι ο κενός χώρος και η πίεση των αερίων που δέχεται το πέτρωμα είναι μεγαλύτερη. Για τη δημιουργία αυτής, υπεύθυνη είναι η σταδιακή εκτόνωση των αερίων που δημιουργούνται στον ευρύτερο χώρο της έκρηξης κατά την ωστική φάση. Η ωστική φάση ακολουθεί την κρουστική φάση, η οποία διαρκεί μερικές δεκάδες έως και εκατοντάδες μς. Η πίεση δίνεται σύμφωνα με τους παρακάτω τύπους :

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

Τύπος σύμφωνα με τον Roberts

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 εκρηκτικού,

D : η ταχύτητα έκρηξης,

C : η ταχύτητα διάδοσης του κρουστικού κύματος στο πέτρωμα.

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

Τύπος σύμφωνα με τον Noren

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.^[1]

Ανάκλαση και διάθλαση κρουστικού παλμού

Όταν το κρουστικό κύμα συναντήσει ελεύθερη επιφάνεια ή διεπιφάνεια, δηλαδή ένα αντικείμενο με διαφορετικές φυσικές και ελαστικές ιδιότητες από το αρχικό, τότε ένα μέρος του προσπίπτοντας κύματος θα ανακλαστεί και ένα μέρος του θα υποστεί διάθλαση. Τα ποσοστά αυτά αυτά προσδιορίζονται από τη σύνθετη αντίσταση κάθε υλικού η οποία δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$Z = \rho V$$

Όπου: Z : η σύνθετη αντίσταση του υλικού,

ρ : η πυκνότητα του υλικού,

V : η ταχύτητα διάδοσης του κύματος στο υλικό.

Ακόμη, η ταχύτητα διάδοσης του κύματος στο υλικό V είναι διαφορετική από τη μοριακή ταχύτητα v του υλικού, δηλαδή την ταχύτητα με την οποία ταλαντώνονται τα μόρια του υλικού καθώς δέχονται το κρουστικό κύμα. Η τάση σ_x που δέχεται το υλικό εξαρτάται και από τις δύο ταχύτητες. Σε μια διάσταση ο τύπος της τάσης σ_x δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_x = \rho V u$$

Το μέγεθος των τάσεων που διαθλώνται ή/και ανακλώνται ως συνάρτηση της τάσης του αρχικού παλμού προκύπτει από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\sigma_t = \sigma_i \frac{2}{1+n}$$

$$\sigma_r = \sigma_i \frac{1-n}{1+n}$$

Όπου: σ_i : η τάση που οφείλεται στο προσπίπτον κύμα,
 σ_t : η τάση που οφείλεται στο διαθλώμενο κύμα,
 σ_r : η τάση που οφείλεται στο ανακλώμενο κύμα,
 n : ο λόγος των σύνθετων αντιστάσεων του πρώτου και δεύτερου υλικού.

Το άθροισμα των δύο νέων παλμών ισούται με τον αρχικό σύμφωνα με τη σχέση:

$$\sigma_i = \sigma_t + \sigma_r$$

όπου όμως λαμβάνεται υπόψη η φορά διάδοσης του κάθε παλμού. Επομένως $\sigma_i = \sigma_t - \sigma_r$ λόγω του ότι ο ανακλώμενος παλμός κινείται αντίθετα προς τον προσπίπτοντα.

Η ποσότητα ενέργειας που διαθλάται ή ανακλάται ως συνάρτηση της ενέργειας του προσπίπτοντα παλμού δίνεται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$E_r = \frac{(Z_1 - Z_2)^2}{(Z_1 + Z_2)^2} E_i$$

$$E_t = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} E_i$$

Όπου: E_i : η ενέργεια του προσπίπτοντα παλμού.

E_r : η ενέργεια του ανακλώμενου παλμού.

E_t : η ενέργεια του διαθλώμενου παλμού.

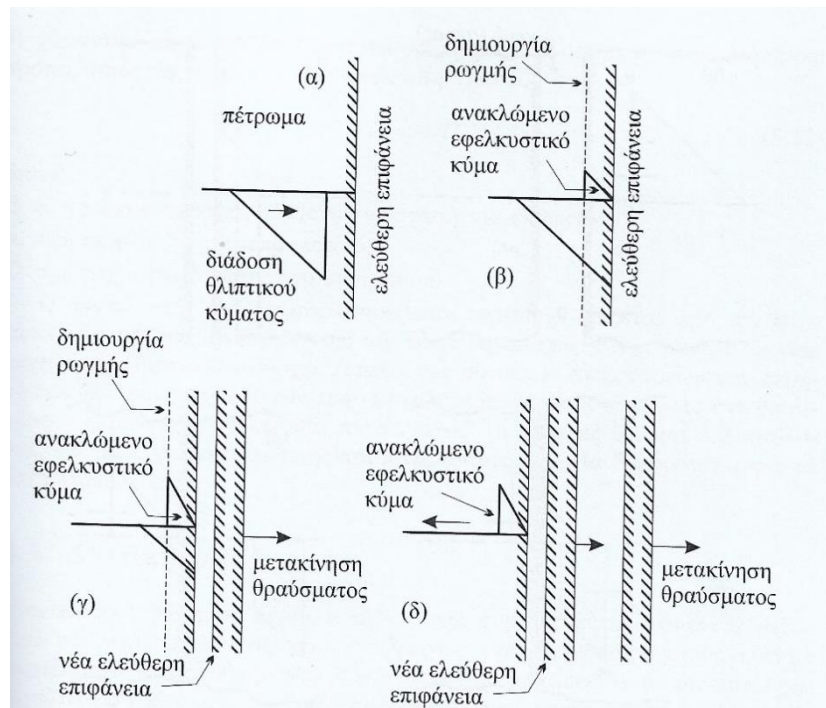
Z_1, Z_2 : η σύνθετη αντίσταση του πρώτου και του δεύτερου υλικού αντίστοιχα. ^[1]

Πρόσπτωση του κρουστικού κύματος σε ελεύθερη επιφάνεια

Όταν το θλιπτικό κύμα συναντά μια ελεύθερη επιφάνεια τότε $\rho_1 V_1 > \rho_2 V_2$ (και $Z_1 > Z_2$) και επομένως το ανακλώμενο κύμα είναι πάντα εφελκυστικό. Έτσι, στο σημείο του πετρώματος ανάμεσα από το σημείο της έκρηξης και της ελεύθερης επιφάνειας ασκούνται τόσο εφελκυστικές όσο και θλιπτικές ακτινικές τάσεις και αυξάνει ο θρυμματισμός του. Κατά τις περιπτώσεις αυτές είναι εμφανής η θραύση με διαχωρισμό κατά πλάκες ή με

απολέπιση. Οι φάσεις της θραύσης από την ανάκλαση του θλιπτικού κύματος φαίνονται στο σχήμα 4.

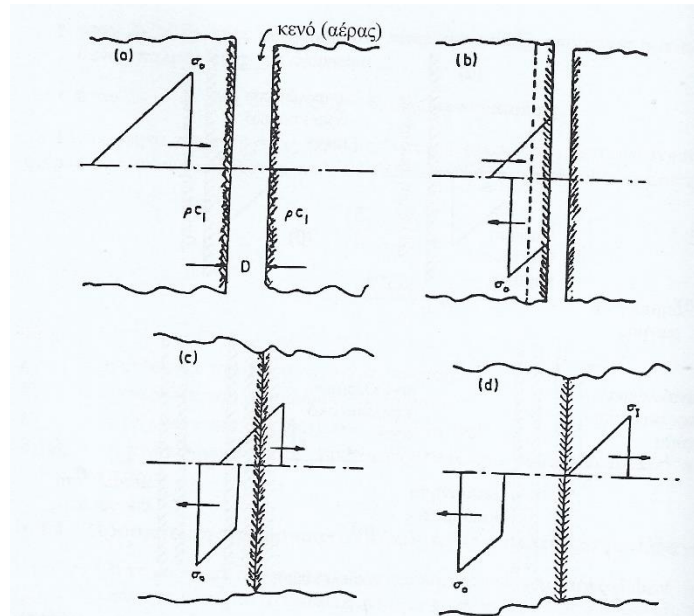
Όταν η διεύθυνση του προσπίπτοντος κύματος δεν είναι κάθετη στη ελεύθερη επιφάνεια τότε το φαινόμενο της ανάκλασης είναι πιο σύνθετο, συνεπώς δημιουργείται παλμός εφελκυστικός με μικρότερη ένταση. Ακόμη, ο αριθμός των διαδοχικών ανακλάσεων μεταξύ ελεύθερων επιφανειών είναι δυνατό να προσδιορίσει τα χαρακτηριστικά του κρουστικού παλμού. ^[1]



Σχήμα 4: Απολέπιση λόγω εφελκυστικών τάσεων που παράγονται από ανάκλαση θλιπτικών παλμών.

Πρόσπτωση του κρουστικού κύματος σε ανοικτή ρωγμή

Όταν το θλιπτικό κύμα συναντάει μια ανοικτή ρωγμή, τότε το κύμα ανακλάται μέχρι να κινηθεί το ένα τοίχωμα του ανοίγματος λόγω του κύματος και να φτάσει στο άλλο τοίχωμα. Τη στιγμή που το αρχικό άνοιγμα κλείσει τότε μέρος του αρχίζει να διαδίδεται μέσα στη νέα διεπιφάνεια. Στο σχήμα 5 φαίνονται οι φάσεις του σύνθετου αυτού κύματος.



Σχήμα 5: Διάδοση θλιπτικού παλμού μέσα από ανοικτή ρωγμή

Ο παρακάτω τύπος του Rayleigh δίνει την ανακλώμενη ενέργεια στη περίπτωση πρόσπτωσης σε ανοικτή ρωγμή.

$$E_r = \frac{\left[\frac{Z_1}{Z_2} - \frac{Z_2}{Z_1} \right]}{\sqrt{4 \cot^2 \left(\frac{2\pi t}{\lambda} \right) - \left[\frac{Z_1}{Z_2} - \frac{Z_2}{Z_1} \right]^2}}$$

Όπου: E_i : η ενέργεια του προσπίπτοντα παλμού.

E_r : η ενέργεια του ανακλώμενου παλμού.

t : το πλάτος της ρωγμής (το πάχος του στρώματος του αέρα)

λ : το μήκος κύματος του παλμού στον αέρα δηλαδή $\lambda = V_2/F$ όπου F η συχνότητα του παλμού και V_2 η ταχύτητα διάδοσης του κύματος στον αέρα. ^[1]

Ωστική φάση

Κατά τη διάρκεια της ωστικής φάσης, τα προϊόντα που είναι αέρια της έκρηξης εκτονώνονται αδιαβατικά και εισχωρούν βαθιά σε ρωγμές. Έτσι, ασκείται μια πίεση που είναι σχεδόν στατική για μεγαλύτερο χρόνο από τον χρόνο δράσης του κρουστικού κύματος. Αυτό οδηγεί στην διεύρυνση των ρωγμών και στην μετατόπιση των κομματιών του πετρώματος από την αρχική τους θέση σε άλλη. ^[1]

Έκρηξη και ανάφλεξη

Ανάφλεξη είναι μια εξώθερμη αντίδραση(χαμηλής ταχύτητας) που πολλές φορές περιγράφεται ως καύση σε ατμοσφαιρικές συνθήκες.

Έκρηξη είναι επίσης μια εξώθερμη χημική αντίδραση(υψηλής όμως ταχύτητας) που πραγματοποιείται σε συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας. ^[1]

Αρχές της διείσδυσης στα πετρώματα

Οι μελέτες διείσδυσης στα πετρώματα χρησιμοποιούν κατατάξεις ως προς το μέγεθος του διατρήματος, τον τύπο της ενεργειακής πηγής που χρησιμοποιείται καθώς και τον τρόπο μεταφοράς της ενέργειας. Στη κατάταξη αυτή περιλαμβάνονται τα συστήματα που χρησιμοποιούνται τόσο στη διάτρηση όσο και στη κοπή των πετρωμάτων με την παρατήρηση ότι ο όρος συνήθως περιγράφει τη μηχανική διατήρηση.

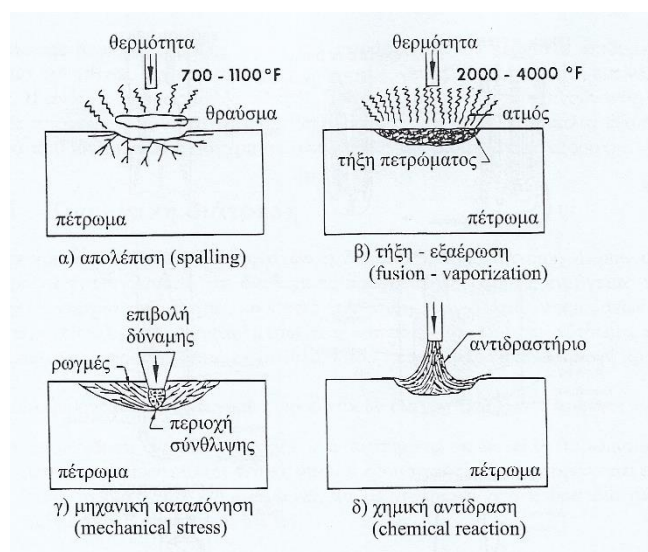
Οι μέθοδοι προσβολής του πετρώματος διακρίνονται στις εξής κατηγορίες, σύμφωνα με τον πίνακα 1:

- **Μηχανική προσβολή:** Πραγματοποιείται με την μεταφορά ενέργειας σε μορφή μηχανικής στο πέτρωμα με κρουστικό ή περιστροφικό τρόπο ή και ακόμα με τον συνδιασμό τους.
- **Προσβολή με υγρά μέσα:** Πραγματοποιείται με νερό υψηλής πίεσης που διαβρώνει το πέτρωμα σε μικρό χρονικό διάστημα.
- **Θερμική προσβολή:** Πραγματοποιείται με φλόγα υψηλών θερμοκρασιών που έχει ως αποτέλεσμα την απολέπιση ή την τήξη του πετρώματος.
- **Προσβολή με υπερήχους:** Επιτυγχάνεται με μετάδοση υψίσυχνων δονήσεων.
- **Προσβολή με χημικά μέσα:** Πραγματοποιείται με χημικής αντιδράσεις, είναι αργή διαδικασία.
- **Προσβολή με συνδυασμό περισσότερων μεθόδων:** Αρκετές φορές οι ήδη προαναφέρουσες μέθοδοι χρησιμοποιούνται συνδυαστικά για να βελτιωθεί η διατήρηση των ειδικών συνηθών. ^[1]

Μέθοδοι προσβολής	Τρόπος μεταφοράς της ενέργειας προσβολής	Εξοπλισμός
Συνήθειες μέθοδοι - Μηχανικές (διάτρηση)	- Κρουστική - Περιστροφική (συρόμενου κοπτικού) - Περιστροφική (περιστρεφόμενου κοπτικού) - Περιστροφική - Κρουστική	- Διατρητική σφύρα - Περιστροφική σφύρα, - συρματόσχοινο, - αλυσίδα
Νέες μέθοδοι - Θερμικές - Υδραυλικές	- Φλόγα - Πλάσμα - Σύντηξη - Ψύξη - Υψηλή Πίεση - Διάβρωση	- Εκτοξευτήρας
Πειραματικές μέθοδοι - Ηχητικές - Χημικές - Ηλεκτρικές - Πυρηνικές		

Πίνακας 1: Συνοπτική παρουσίαση των κυριοτέρων μεθόδων διείσδυσης

Στο σχήμα 6 παρουσιάζονται ενδεικτικά διάφοροι τρόποι θραύσης του πετρώματος.



Σχήμα 6: Διάφοροι τρόποι θραύσης του πετρώματος

Μηχανική διάτρηση

Η μηχανική διάτρηση βασίζεται στην εφαρμογή τάσεων που προκαλούν τη λύση της συνοχής του υλικού και προέρχονται από διαδικασίες κρούσης, διάβρωσης, διείδυσης, κτλ.

Η διαδικασία αυτή αποτελείται από τα ακόλουθα στάδια:

- ☐ Την παραγωγή μηχανικής ενέργειας είτε άμεσα είτε από μετατροπή άλλης
- ☐ Τη μεταφορά της μηχανικής ενέργειας στο κοπτικό άκρο με τη βοήθεια σωλήνων.
- ☐ Τη μεταφορά ενέργειας από το κοπτικό άκρο στο πέτρωμα
- ☐ Την σύλλεξη των θρυμμάτων και σύγχρονη ψύξη και λίπανση των διαφόρων μηχανισμών με τη βοήθεια κάποιου ρευστού. ^[1]

Κρουστική διάτρηση

Στη κρουστική διάτρηση η διείδυση του κοπτικού άκρου στο πέτρωμα πραγματοποιείται με διαδοχικές κρούσεις. Αυτές οι κρούσεις είναι υψηλής ενέργειας και υψηλής συχνότητας και μεταφέρονται από τα κοπτικά άκρα στο πέτρωμα. Έτσι, προκαλούν θραύση ή και σύνθλιψη στο πέτρωμα στην περιοχή που έγινε η κρούση.

Υπάρχουν δύο κατηγορίες κρουστικών διατρητικών συστημάτων:

- ☐ Τα εξωδιατρηματικά: κατά τα οποία ο κρουστικός παλμός παράγεται έξω από το διάτρημα και στη συνέχεια μεταφέρεται στο κρουστικό άκρο μέσω των διατρητικών στελεχών.
- ☐ Τα ενδοδιατρηματικά: κατά τα οποία ο κρουστικός παλμός παράγεται παράγεται κοντά στο κοπτικό άκρο και μέσα στο διάτρημα άρα η κρούση είναι πιο άμεση. ^[1]

Εφαρμογές

Γενικά, σκοπός της εξόρυξης είναι :

1. Η άντληση πετρωμάτων που επιφέρουν οικονομικά οφέλη στη βιομηχανία,
2. Η δημιουργία ανοιχτού χώρου για την δημιουργία σηράγγων και οδών.

Γενικά τα εκρηκτικά χρησιμοποιούνται για την εξόρυξη πετρωμάτων, αφού οι μεγάλες πιέσεις όπως προαναφέρθηκε, οδηγούν στην αποκοπή του απαιτούμενου πετρώματος από το έδαφος.

Σύμφωνα με το Κ.Μ.Λ.Ε οι εκρηκτικοί μηχανισμοί χρησιμοποιούνται για επαγγελματικές ανάγκες στο χώρο των μεταλλείων, των λατομίων και γενικά παρόμοιων επιχειρήσεων.^[6] Επιπροσθέτως, γίνεται χρήση τους για την διάνοιξη δρόμων και τούνελ.

Χρησιμοποιούνται και για να ανοιξεί ένας δρόμος που λόγω κατολισθήσεων έμεινε κλειστός. Σε περιπτώσεις δηλαδή κατά τις οποίες υπήρξαν κατολισθήσεις βραχών λόγω των βρωχών και των σαθρών πετρωμάτων της περιοχής όπως έγινε και στον παλίο δρόμο Κοζάνης-Ιωαννίνων.^[7]



Εικόνα 1: παλιά οδός Κοζάνης-Ιωαννίνων που είναι κλειστή λόγω κατολισθήσεων και χρησιμοποιήθηκαν εκρηκτικοί μηχανισμοί για να θριμματιστούν τα πετρώματα και να ξανα λειτουργήσει^[7,8]

Ακόμη, για την δημιουργία της Αττικής οδού – για την διάνοιξη σηράγγων- χρησιμοποιήθηκαν οι μέθοδοι NATM(Drill and Blast) κατά την οποία το πέτρωμα τρυπάται και μέσα του προστίεται το εκρηκτικό ώστε να γίνει η έκρηξη στο εσωτερικό του. Βέβαια στο συγκεκριμένο έργο χρησιμοποιήθηκαν και η μέθοδος Roadheader για την μείωση και την αποφυγή της χρήσης των εκρηκτικών σε χώρους ιστορικού ενδιαφέροντος(μνημεία, εκκλησίες, κτλ).^[11]



Άλλα παραδείγματα κατά τα οποία χρησιμοποιήθηκαν εκρηκτικά για να δημιουργηθούν σήραγγες και αυτοκινητόδρομοι είναι: ^[12]

- Σήραγγες ΑΣ1, ΑΣ2 & ΑΣ3 ΠΑΘΕ, Τμήμα Κακιά Σκάλα



Σήραγγα ΑΣ1(Γεράνεια)



Σήραγγα ΑΣ2 (Ευφάλκνος)



Σήραγγα ΑΣ3 (Αίθρα)

- Σήραγγα Αυτοκινητοδρόμου Σήραγγα Τ1 Αυτοκινητόδρομος ΠΑΘΕ, Τμήμα Μαλιακός – Κλειδί, Έργο Παραχώρησης Κεντρική Ελλάδα

Χρησιμοποιήθηκαν : NATM – Μηχανικά μέσα & εκρηκτικά.



Τελική επένδυση



Υπόγειο μέτωπο σήραγγας

- Σήραγγα Τ2 Αυτοκινητόδρομος ΠΑΘΕ, Τμήμα Μαλιακός – Κλειδί, Έργο Παραχώρησης Κεντρική Ελλάδα



Υπόγειο μέτωπο σήραγγας



Τελική επένδυση

- Σήραγγα Παναγιάς Εγνατία Οδός, Τμήμα 4.1.1s



Στόμια εισόδου



Στόμιο εξόδου δεξιού κλάδου

Σήραγγα Παναγοπούλας



Σήραγγα Τεμπών



Στο εξωτερικό, όπως για παράδειγμα στον Καναδά, χρησιμοποιείται η μέθοδος Drill and Blast η οποία είναι μια διαδεδομένη έθοδος που χρησιμοποιείται για να σπάει τα πετρώματα.^[13]



Εικόνα από εκρύξεις που πραγματοποιούνται σε ορυχεία.

Γενικά, θα πρέπει να υπάρχει μεγάλη προσοχή στη χρήση των εκρηκτικών μηχανισμών,στη φύλαξη τους και θα πρέπει να τα χειρίζονται άτομα υπεύθυνα, ώστε να αποφευχθούν οποιοδήποτε είδους καταστροφές και αθελής εκρήξεις. Έτσι, τα εκρηκτικά πρέπει να φυλλάσσονται με προσοχή σε ειδικές αποθήκες και να μεταφέρονται με μεγάλη προσοχή στους χώρους που θα χρησιμοποιηθούν από οχήματα που θα περιέχουν την σήμανση ότι μεταφέρουν τέτοιου είδους υλικά.

Υπάρχουν τρεις κατηγορίες οχημάτων που μπορούν να τα μεταφέρουν που είναι:

1. Τύπος οχήματος I : είναι βενζινοκίνητα ή πετρελαιοκίνητα.
2. Οχήματα τύπου II: είναι πετρελαιοκίνητα
3. Τύπος οχήματος III: Είναι αποκλειστικά κλειστού τύπου.

Η κάθε μια κατηγορία-τύπος πρέπει να πληρεί συγκεκριμένες προϋποθέσεις και να υποακούει σε όρους καθορισμένους.

Παρακάτω φαίνεται ενδεικτικά οι επιτρεπόμενες ποσότητες εκρηκτικών υλών ανά τύπο οχήματος.^[9]

ΕΠΙΤΡΕΠΟΜΕΝΕΣ ΠΟΣΟΤΗΤΕΣ ΕΚΡΗΚΤΙΚΩΝ ΥΛΩΝ ΑΝΑ ΤΥΠΟ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΕΚΡΗΚΤΙΚΩΝ	ΠΟΣΟΤΗΤΑ (Kg) / ΤΥΠΟ ΟΧΗΜΑΤΟΣ		
	ΤΥΠΟΣ I	ΤΥΠΟΣ II	ΤΥΠΟΣ III
1.1	50	1000	15.000
1.2	50	3000	15.000
1.3	50	5000	15.000
1.4	300	15.000	15.000
1.5	50	5000	15.000
1.6	50	5000	15.000

Ακόμη, στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα συνήθη επιβλαβή αέρια από εκρήξεις στα υπόγεια έργα.^[9]

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

[9]

Όπου: TLVs: Οριακές τιμές έκθεσης

TWA: Χρονικά σταθμευμένη μέση τιμή.

STEL : Οριακή τιμή έκθεσης μικρής διάρκειας.

Μελλοντική εξέλιξη



Ακόμη, για 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. Αυτή η μέθοδος είναι πρωτοποριακή και είναι ιδανική για περιπτώσεις που οι κοινές εκρήξεις θεωρούνται επικύνδινες, αφού είναι πολύ ασφαλής. Το σύστημα αυτό μειώνει τα αέρια του αζώτου, και δονήσεις και χρήση λιγότερης ποσότητας εκρηκτικών ανά μέτρο. Επίσης, μπορεί να δημιουργεί πολλές τρύπες στο πέτρωμα μέσα στον χρόνο και για αυτό είναι καλό να χρησιμοποιείται σε τούνελ, και σε ορυχεία.^[10]



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

Γενικά, η μέθοδος του Royex είναι η ιδανική και εναλλακτική μέθοδος για την ανάπτυξη των τούνελ και ορυχείων σε ευαίσθητες περιοχές.

Συμπέρασμα

Εν κατακλείδι, αναφέρθηκαν οι κύριοι μηχανισμοί των εκρηκτικών μηχανισμών και οι εφαρμογές αυτών καθώς και παράμετροι. Όπως έγινε κατανοητό, οι εκρηκτικές ύλες ήταν, είναι και θα είναι απαραίτητοι για διεκπεραίωση έργων κατά τα οποία δεν μπορεί να γίνει

χρήση μηχανικών μεθόδων εξόρυξης, και στο μέλλον έχουμε προσδοκίες για ανάπτυξη ακόμα πιο εξελιγμένων και εύχρηστων μεθόδων με αρωγό πάντα τις εκρηκτικές ύλες και προστασία του περιβάλλοντος και της κοινωνίας.

Βιβλιογραφία

1. Στοιχεία Διάτρησης-ανατίναξης, Ζ. Γ. Αγιουτάντης, 2^η έκδοση, Εκδόσεις Ίων
2. Εκρηκτικές ύλες & Μέσα Έναυσης-Ιστορική αναδρομή, Γ. Παναγιώτου, Εξόρυξη Πετρωμάτων Ι
3. Εξόρυξη Πετρωμάτων Ι, Εξόρυξη με Εκρηκτικές Ύλες, Μέρος Ι-Εισαγωγή, Γ. Παναγιώτου
4. <https://www.britannica.com/science/shock-wave>
5. https://eclass.duth.gr/modules/document/file.php/TME266/strength-01_2017-updtd.pdf
6. <https://www.e-nomothesia.gr/kat-opla-ekrektika-puromakhika/nomos-4678-2020-phek-70a-20-3-2020.html> άρθρο 2,δ
7. <https://www.iefimerida.gr/news/390416/kleisti-apo-katolisthiseis-i-palaia-odos-kozanis-ioanninon-o-dromos-tha-anoixei-me>
8. <https://www.voria.gr/article/klisti-i-palea-odos-kozanis-ioanninon-apo-katolisthisi>
9. http://library.tee.gr/digital/books_notee/elinyae/book_59174.pdf
10. <https://www.linkedin.com/pulse/royex-rock-breaking-system-new-approach-underground-gustavsson>
11. <https://www.aodos.gr/i-etaireia/perigrafi/>
12. http://www.omikronkappa.gr/22-Stuff/04-Erga/04-01-Ektelesmena/04-01-Ektelesmena_GR/tunnels_underground_GR.pdf?fbclid=IwAR1mvv7WBaymBklx-mz3xtpkdfzWaA28InMXoXm9cBTIEZKG-NCgJDgbxQ4
13. <https://www.minescanada.ca/en/content/mining-and-explosives>