

Βελτιστοποίηση της εξόρυξης

Πως με κατάλληλο σχεδιασμό αποφεύγουμε την ατελή έκρηξη των χρησιμοποιούμενων υλικών

Εισαγωγή

Ένα από τα σοβαρότερα προβλήματα που μπορεί να προκύψουν στα πλαίσια της εξορυκτικής διαδικασίας είναι η ατελής έκρηξη των χρησιμοποιούμενων εκρηκτικών υλών. Με τον όρο ατελής έκρηξη νοείται ο εσφαλμένος χρόνος έναυσης, η μειωμένη ισχύς έκρηξης, ή/και η πλήρης αστοχία του γεμίσματος. Τα συμβάντα αυτά, που οφείλονται είτε στην ίδια την εκρηκτική ύλη είτε στα μέσα πυροδότησης αυτής, έχουν ως αποτέλεσμα η ενέργεια που εκλύεται κατά την έκρηξη να διαχέεται στον χώρο υπό την μορφή δονήσεων χωρίς να παράγεται επαρκές ωφέλιμο έργο. Κατά συνέπεια, στην πλειονότητα των περιπτώσεων, η θραύση του πετρώματος είναι ανομοιομορφη, ενώ λαμβάνει χώρα έκλυση τοξικών αερίων.

Κατά κανόνα, οι εμπορικές εκρηκτικές ύλες έχουν ως βασικό συστατικό τους το νιτρικό αμμώνιο, με αποτέλεσμα όταν εκρήγνυνται να εκλύεται κυρίως άζωτο (N_2), διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και νερό (H_2O). Στην περίπτωση όμως της ατελούς έκρηξης, οι χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα οδηγούν στην παραγωγή τοξικών αερίων όπως μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και οξειδία του αζώτου (NO_x : NO , NO_2 και N_2O). Απότοκη της παραγωγής τέτοιων αερίων είναι η μείωση της συνολικής ενέργειας που απελευθερώνεται κατά την έκρηξη, άρα και της ενέργειας που μετατρέπεται σε ωφέλιμο έργο για τη θραύση των πετρωμάτων. Για παράδειγμα, στην περίπτωση του ANFO, αν αντί τέλειας έκρηξης ($37 NH_4NO_3 + C_{12}H_{26} \rightarrow 37 N_2 + 12 CO_2 + 87 H_2O$), παραχθεί μικρή ποσότητα CO ή NO_2 , η παραγόμενη ενέργεια έκρηξης ανά kg προϊόντος μειώνεται αισθητά (2-5 %), γεγονός που οδηγεί σε σημαντική ελάττωση της αποδοτικότητας της εξορυκτικής διαδικασίας. Πέραν της αποδοτικότητας, εγείρονται ζητήματα ασφάλειας, κυρίως λόγω της υψηλής επικινδυνότητας της απομάκρυνσης από τα μάζα των υπολειμμάτων εκρηκτικών υλών, που απομένουν σε περίπτωση αστοχίας τους.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, όμως, η ατελής έκρηξη δεν σχετίζεται με την ποιότητα των εκρηκτικών αλλά με τον τρόπο που αυτά χρησιμοποιούνται. Ως εκ τούτου, η επίγνωση των αιτιών του φαινομένου είναι υψίστης σημασίας για την

υψηλή αποδοτικότητα της εξορυκτικής διαδικασίας αλλά και την ασφαλή διεξαγωγή της. Ως απόρροια, λοιπόν, της σοβαρότητάς του, το εν λόγω ζήτημα έχει αποτελέσει αφορμή για τη διενέργεια ενδεδειγμένης έρευνας, από την οποία έχει καταδειχθεί ότι τρεις είναι οι βασικοί λόγοι ατελούς έκρηξης: α) η απευαισθητοποίηση της εκρηκτικής ύλης (desensitization) β) η συμπαθητική ενεργοποίηση (sympathetic detonation), και γ) η αστοχία του μέσου έναυσης. Οι τρεις αυτοί λόγοι αναλύονται ακολούθως.

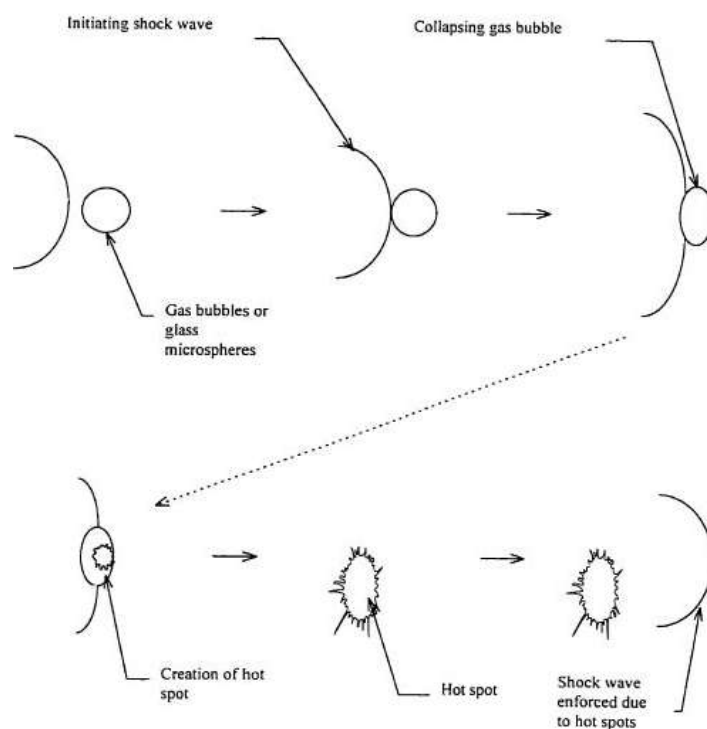
Απευαισθητοποίηση εκρηκτικής ύλης

Μία βασική παράμετρος που επηρεάζει την απόδοση ενός εκρηκτικού είναι η πυκνότητά του. Μικρές μεταβολές στην πυκνότητα επιδρούν σημαντικά στις ευχέρεια πυροδότησής του, δηλαδή στην ευαισθησία του κι ως εκ τούτου στην απόδοσή του. Γενικώς, της πυκνότητας αυξανόμενης, αυξάνεται η ενέργεια έκρηξης, ενώ αντίστοιχα η μετρούμενη ταχύτητα έκρηξης λαμβάνει υψηλότερες τιμές. Ωστόσο, πέραν μίας κρίσιμης τιμής της πυκνότητας, η διέγερση καθίσταται δυσχερής. Κατά τη διάρκεια της ανατίναξης, η πυκνότητα του εκρηκτικού μπορεί να μεταβληθεί εξαιτίας των πιέσεων που ασκούνται από το ωστικό κύμα που αναπτύσσεται από την έκρηξη γειτνιαζόντων διατρημάτων. Το κατά πόσο θα μεταβληθεί η πυκνότητα εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του εδάφους, το είδος της εκρηκτικής ύλης, αλλά και τον σχεδιασμό της ανατίναξης, και πιο συγκεκριμένα από τη διάμετρο, το φορτίο, και την απόσταση των διατρημάτων.

Η ευαισθητοποίηση των εκρηκτικών γαλακτωμάτων κατά κανόνα επιτυγχάνεται με την δημιουργία θυλάκων αερίου εντός της μάζας τους, είτε με χημικό (ανάπτυξη φυσαλίδων) είτε με φυσικό τρόπο (προσθήκη μικροσφαιριδίων). Οι θύλακες αυτοί, υπό την επίδραση του κρουστικού κύματος εκρήξεως που αναπτύσσεται κατά την έναυση της εκρηκτικής ύλης, μετατρέπονται σε εστίες υψηλών πιέσεων και θερμοκρασιών (hot spots), εξυπηρετώντας επί της ουσίας ένα διπλό σκοπό: αυξάνουν την ευαισθησία διέγερσης και καθιστούν ευχερή την διάδοση του εκρηκτικού κύματος εντός της μάζας του εκρηκτικού.

Αναφορικά με τον μηχανισμό της, δια της δημιουργίας θυλάκων αέρα ευαισθητοποίησης των γαλακτωμάτων, έχουν προταθεί διάφορες ερμηνείες. Σύμφωνα με την επικρατέστερη ερμηνεία, το κύμα που παράγεται αρχικά από τον πυροκροτητή

και καθώς οδεύει εντός της εκρηκτικής ύλης, προκαλεί αδιαβατική συμπίεση και ως εκ τούτου θέρμανση του αέρα εντός των θυλάκων. Μάλιστα, η άνοδος της θερμοκρασίας στο εσωτερικό αυτών των πυρήνων διάδοσης είναι τέτοια που οδηγεί στη χημική αποσύνθεση της εκρηκτικής ύλης στην περιοχή πέριξ των θυλάκων. Αυτές οι μικρές αντιδρώσες περιοχές συντελούν στη δημιουργία μίας ζώνης αντίδρασης υψηλής θερμοκρασίας και πίεσεως, η οποία με τη σειρά της ενισχύει το μέτωπο της έκρηξης. Το παραγόμενο κύμα αναπτύσσεται εντός της εκρηκτικής ύλης, αναδημιουργώντας συνεχώς τη ζώνη αντίδρασης/αποσύνθεσης στις ανέγγιχτες περιοχές του εκρηκτικού, εδραιώνοντας τελικά σταθερή ταχύτητα όδευσης στο μέτωπο της έκρηξης. Ο μηχανισμός αυτός παρουσιάζεται σχηματικά στην εικόνα 1.



Εικόνα 1: Σχηματική αναπαράσταση δημιουργίας πυρήνων διάδοσης (hot-spot) εντός των εκρηκτικών γαλακτωμάτων [A. Ghorbani, The Study of Explosives Malfunction in Parallel Charges, Queen's University Kingston, Canada, 1997]

Βάσει του μηχανισμού αυτού, γίνεται κατανοητό ότι η μείωση του όγκου που καταλαμβάνουν οι φυσαλίδες εντός της εκρηκτικής ύλης δυσχεραίνει την δημιουργία πυρήνων διάδοσης. Ως εκ τούτου, αναλόγως των συνθηκών που επικρατούν, η

απόδοση των εκρηκτικών μπορεί να ποικίλει από την τέλεια ανατίναξη έως την πλήρη αστοχία. Η αύξηση της πυκνότητας του γεμίματος είναι απότοκη της συμπίεσης (dead-pressing) που δέχεται ως απόρροια της επίδρασης του ωστικού κύματος που παράγεται από την έκρηξη γειτνιαζόντων διατρημάτων, ή ακόμη και από την έκρηξη υλικών εντός του ίδιου διατρήματος (όταν υπάρχουν ασυνέχειες λόγω ατελούς γόμωσης ή/και λόγω δονήσεων από την έκρηξη πλαϊνών διατρημάτων).

Το αποτέλεσμα της συμπίεσης μπορεί να είναι είτε μόνιμο είτε παροδικό και εξαρτάται κυρίως από: α) την σφοδρότητα των παραγόντων που προκαλούν την συμπίεση της εκρηκτικής ύλης και β) την ελαστικότητα των μικροσφαιριδίων. Αν δηλαδή, η συμπίεση που έχει προκληθεί, πχ από την έκρηξη γειτονικού διατρήματος, είναι τέτοια που επιτρέπει στο εκρηκτικό να επανέλθει στην πρότερή του κατάσταση, η απόδοσή του δεν θα επηρεαστεί σημαντικά, αρκεί η έναυσή του να λάβει χώρα μετά την πλήρη επαναφορά του. Αν όμως η βλάβη των μικροσφαιριδίων ή γενικότερα η κατάρρευση των θυλάκων είναι μόνιμη, τότε είναι πιθανή ακόμη και η πλήρης αστοχία της εκρηκτικής ύλης.

Με βάση την συμπεριφορά που επιδεικνύουν σε αυτήν την πολύπλοκη διαδικασία, οι εκρηκτικές ύλες διακρίνονται σε εύκαμπτες (resilient) και μη. Στην περίπτωση των μη-εύκαμπτων εκρηκτικών υλών, άπαξ και λάβει χώρα το φαινόμενο της απευαισθητοποίησης, αυτές έχουν την τάση να διατηρηθούν σε αυτήν την κατάσταση. Κατά συνέπεια, η απευαισθητοποίηση καθίσταται μόνιμη και σταθερή με το χρόνο. Τα γαλακτώματα είναι υλικά που εν πολλοίς κατατάσσονται σε αυτήν την κατηγορία, καθότι η συμπίεσή τους, αναλόγως βεβαίως και της έντασης με την οποία αυτή λαμβάνει χώρα, μπορεί να προκαλέσει μόνιμη καταστροφή των φυσαλίδων και συνεπώς μη-αναστρέψιμη αύξηση της πυκνότητάς τους. Από την άλλη πλευρά, στην περίπτωση των ελαστικών εκρηκτικών, υπάρχει ένα 'παράθυρο' μεταξύ του χρονικού σημείου που ξεκινά η επίδραση του παλμού συμπίεσης (η οποία προκαλεί παροδική απευαισθητοποίηση του υλικού) και του σημείου που η εκρηκτική ύλη έχει ανακτήσει την πυκνότητά της καθιστώντας δυνατή την πλήρη έναυσή της. Αν ο χρόνος καθυστέρησης του πυροκροτητή που έχει επιλεγεί για την έναυση τύχει να είναι εντός αυτού του χρονικού 'παραθύρου', τότε παρατηρούνται προβλήματα μειωμένης απόδοσης ή ακόμη και αστοχιών.

Συμπαθητική ενεργοποίηση

Ως συμπαθητική ενεργοποίηση ή εκ συμπαθείας εκτόνωση (sympathetic detonation) χαρακτηρίζεται το φαινόμενο κατά το οποίο λαμβάνει χώρα ενεργοποίηση μίας εκρηκτικής ύλης υπό την επίδραση του ωστικού κύματος που παράγεται από την έκρηξη μία άλλης που βρίσκεται σε απόσταση, πχ εντός γειτονικού διατηρήματος. Αυτή η τάση των εκρηκτικών για εξ αποστάσεως ενεργοποίηση είναι η αιτία που οι αποθήκες των εκρηκτικών αναλόγως της χωρητικότητας τους πρέπει να κατασκευάζονται σε ορισμένη απόσταση η μία από την άλλη, αλλά και με συγκεκριμένο προσανατολισμό. Στο ίδιο φαινόμενο αποδίδεται και η συχνά παρατηρούμενη ενεργοποίηση πολεμικών εκρηκτικών, πχ. ναρκών ή τορπιλών, που λαμβάνει χώρα από την έκρηξη άλλων που βρίσκονται εγγύς και στον αυτό χώρο.

Στην περίπτωση των εξορύξεων αυτή η τάση των εκρηκτικών μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την ακρίβεια του (προκαθορισμένου) χρόνου πυροδότησης σε μια αλληλουχία εκρήξεων, με συνέπεια την δημιουργία ανεπιθύμητων δονήσεων και τον αναποτελεσματικό θρυμματισμό των πετρωμάτων. Βεβαίως, ο τεμαχισμός και η απόσπαση του πετρώματος πρωτίστως δυσχεραίνεται λόγω της μειωμένης απόδοσης της εκρηκτικής ύλης, η οποία είναι απότοκη της πρόωρης και ατελούς (χωρίς την χρήση πυροκροτητή) διέγερσής της (ουσιαστικά επιτελείται κατάκαυση και όχι έκρηξη της ύλης). Μία από τις εμπορικές εκρηκτικές ύλες, οι οποίες είναι ιδιαίζόντως επιρρεπείς στην συμπαθητική ενεργοποίηση, είναι η ζελατινοδυναμίτιδα ένεκα της υψηλής ευαισθησίας της. Ως αποτέλεσμα, παρατηρείται (περαιτέρω) έκλυση τοξικών αερίων και μειωμένη εκλυόμενη ενέργεια έκρηξης.

Όπως στην περίπτωση της απευαισθητοποίησης, ο παράγοντες που δύνανται να προκαλέσουν την συμπαθητική ενεργοποίηση είναι αρκετοί, και για την αποσόβησή της θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό της ανατίναξης. Οι κυριότεροι από αυτούς τους παράγοντες είναι:

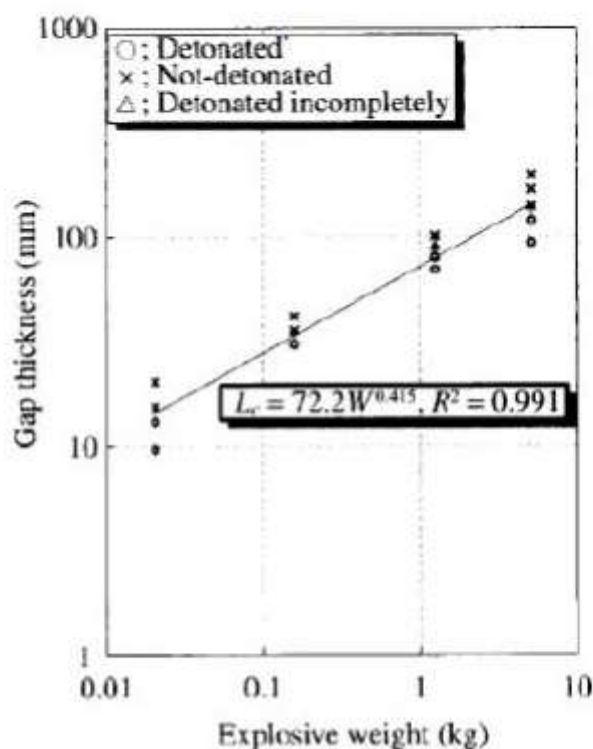
- το γεωλογικά χαρακτηριστικά του πετρώματος
- το είδος τη εκρηκτικής ύλης
- η κλίση των διατηρημάτων
- η διάμετρος των διατηρημάτων

- η απόσταση μεταξύ δότη (εκρηκτικής ύλης που πυροδοτεί) και δέκτη (εκρηκτικής ύλης που πυροδοτείται)
- το είδος της γόμωσης
- η παρουσία και η θέση ενισχυτών (booster) έκρηξης.

Η διάμετρος των διατρημάτων εξαρτάται άμεσα από τον διαθέσιμο εξοπλισμό και εκτός εξαιρετικών περιπτώσεων διατηρείται σταθερή σε μια ανατίναξη. Ο προσανατολισμός όμως και η απόσταση ποικίλουν. Ο προσανατολισμός της διάταξης δότη-δέκτη είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες απευαισθητοποίησης ή συμπαθητικής ενεργοποίησης των εκρηκτικών υλών. Αναλόγως της εφαρμογής, τα διατρήματα ορύσσονται κατακόρυφα, κεκλιμένα ή οριζόντια, με στόχο πρωτίστως τον θρυμματισμό του πετρώματος σε τεμάχια μεγέθους που επιτρέπει την ευκολότερη απομάκρυνσή τους από το μέτωπο (φόρτωση και μεταφορά) και την ευχερέστερη περαιτέρω επεξεργασία τους και δευτερευόντως τη μείωση των προκαλούμενων δονήσεων. Στην πράξη εντούτοις, η γεωμετρία των διατρημάτων δεν είναι αυτή που ορίζεται κατά τον σχεδιασμό. Οι αποκλίσεις όμως αυτές είναι πιθανό να προξενήσουν το φαινόμενο της ακούσιας πυροδότησης, επηρεάζοντας αρνητικά την ασφαλή διεξαγωγή και την αποδοτικότητα της εξορυκτικής διαδικασίας.

Βεβαίως, ο πρωταρχικός παράγοντας για την αποτελεσματική ή μη ενεργοποίηση των εκρηκτικών υλών είναι απόσταση μεταξύ των διατρημάτων. Αναλόγως των χαρακτηριστικών του εδάφους και της χρησιμοποιούμενης εκρηκτικής ύλης, η εσφαλμένη επιλογή της απόστασης μεταξύ των διατρημάτων είναι πιθανό να προξενήσει από συμπαθητική ενεργοποίηση έως πλήρη απευαισθητοποίηση, σίγουρα όμως προκαλεί ακανόνιστες (εκτός του προκαθορισμένου χρονοδιαγράμματος) πυροδοτήσεις. Ο Ishikawa και οι συνεργάτες του προσπάθησαν μάλιστα να συσχετίσουν την ποσότητα της εκρηκτικής ύλης εντός των διατρημάτων με την απόσταση, πέραν της οποίας εξαλείφεται το φαινόμενο της συμπαθητικής ενεργοποίησης. Χρησιμοποιώντας ως εκρηκτική ύλη γαλάκτωμα, κατέληξαν στο ότι η σχέση μεταξύ αυτών των δύο μεγεθών, όπως φαίνεται και στην εικόνα 2, είναι γραμμική. Τα αποτελέσματα της ερευνάς τους έχουν καταγραφεί στο άρθρο τους με τίτλο: 'Study on the Shock Sensitivity of an Emulsion Explosive by the Sand Gap Test' (Science and Technology of Energetic Materials 67.6 (2006): 199-204). Η

συνάρτηση αυτή ισχύει βεβαίως για την συγκεκριμένη εφαρμογή, ωστόσο υποδηλώνει ότι γενικότερα είναι δυνατή η ποσοτικοποίηση της επίδρασης της ποσότητας της εκρηκτικής ύλης στην απόσταση μεταξύ των διατρημάτων, προκειμένου να αποφευχθεί η συμπαθητική ενεργοποίηση.



Εικόνα 2: Συσχέτιση απόστασης διατρημάτων-ποσότητας εκρηκτικής προς αποφυγή συμπαθητικής ενεργοποίησης

Η ποσότητα της εκρηκτικής ύλης προσδιορίζει ουσιαστικά την ενέργεια που θα εκλυθεί άρα και το μέγεθος της πίεσης που θα ασκηθεί στα γειτονικά διατρήματα. Μάλιστα, οι Liu και Tidman, (Estimation of the Dynamic Pressure Around a Fully Loaded Blasthole – CANMET/MRL Experimental mine, March 1995) προσπάθησαν να προσδιορίσουν την τιμή της πίεσης, υπό την οποία το εκρηκτικό-δέκτης παρουσιάζει συμπαθητική ενεργοποίηση. Επιπροσθέτως, διατύπωσαν μία ημι-εμπειρική συνάρτηση πρόβλεψης της τιμής της πίεσης που αναπτύσσεται γύρω από το διάτρημα για διαφόρους τύπους πετρωμάτων και είδη εκρηκτικών υλών: $P = P_m (R/R_0)^a$, με $P_m = 1.62 (\rho_0 D^2)(\rho_r C / \rho_0 D)^{0.25}$ και $a = 1.54 (D/C)^{0.33}$, όπου P = η πίεση σε απόσταση R από το κέντρο του διατρήματος, P_m = η μέγιστη πίεση στο τοίχωμα του διατρήματος, a = η πτώση της πίεσης, ρ_0 = η πυκνότητα του εκρηκτικού, ρ_r = η

πυκνότητα του πετρώματος, D = η ταχύτητα έκρηξης, και C = η ταχύτητα του ήχου εντός του πετρώματος. Τα αποτελέσματα ήταν ενδιαφέροντα και μπορούν να φανούν χρήσιμα για το σχεδιασμό μιας ανατίναξης.

Η πίεση που ασκείται σε μια εκρηκτική ύλη από γειτονικές εκρήξεις αυξάνεται θεαματικά εν τη παρουσία νερού στα διατρήματα. Επομένως, η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των διατρημάτων, προκειμένου να αποσοβηθεί η εμφάνιση απευαισθητοποίησης ή συμπαθητικής εκτόνωσης, αυξάνεται σημαντικά όταν υπάρχει νερό στην περιοχή της εξόρυξης. Η παρουσία νερού προκαλεί αυτό που στην μηχανική των ρευστών ονομάζεται υδραυλικό πλήγμα (**water hammer effect**). Η πρόκληση του υδραυλικού πλήγματος είναι απόρροια απότομης μεταβολής της ταχύτητας του ρευστού ή της πίεσης εντός κλειστών αγωγών. Κατά την διάρκεια του φαινομένου αναπτύσσονται ισχυρές εναλλασσόμενες υπερπίεσεις και υποπίεσεις, οι οποίες μεταδίδονται με τη μορφή κυμάτων και με την ταχύτητα του ήχου εντός του ρευστού, ασκώντας έντονες θλιπτικές και εφελκυστικές τάσεις στα περιβάλλοντα υλικά. Για να εξελιχθεί το φαινόμενο πρέπει γενικώς να ικανοποιούνται τέσσερις προϋποθέσεις: α) παρουσία ρευστού, β) απότομη μεταβολή της πίεσης ή ταχύτητας του ρευστού, γ), επαρκές μήκος αγωγού για να αναπτυχθεί το φαινόμενο, και δ) ακαμψία/στιβαρότητα του αγωγού. Στην περίπτωση των διατρημάτων που περιέχουν νερό, φυσικά ικανοποιούνται και οι τέσσερις αυτές απαιτήσεις.

Η ένταση του φαινομένου εξαρτάται από την έκταση αλλά και από τη διάρκειά της μεταβολής της πίεσης, η οποία όπως προαναφέρθηκε προκαλεί την δημιουργία του υδραυλικού πλήγματος. Στις εφαρμογές που γίνεται χρήση ρευστών, προς αποφυγήν του φαινομένου του υδραυλικού πλήγματος, εξασφαλίζεται ότι ο χρόνος που θα διαρκέσει η όποια μεταβολή της πίεσης θα είναι αρκετά μεγάλος, ώστε τα κύματα πίεσης που θα αναπτυχθούν να είναι αμελητέα. Στην περίπτωση, όμως, των εξορύξεων που γίνεται χρήση εκρηκτικών, λόγω των αναπτυσσόμενων ωστικών κυμάτων, η μεταβολή της πίεσης εκτός από μεγάλη είναι και σχεδόν ακαριαία. Γίνεται επομένως κατανοητό ότι, η παρουσία του νερού λόγω του φαινομένου του υδραυλικού πλήγματος επηρεάζει δραστικά την λειτουργία τόσο των εκρηκτικών υλών όσο και των πυροκροτητών που χρησιμοποιούνται για την διέγερσή τους.

Η επίδραση του υδραυλικού πλήγματος αποτυπώνεται αδρά στην μελέτη του Adam Michael Doerfler με τίτλο: ‘The effects of water on sympathetic detonation and dead pressing of dynamite and emulsions’ (Master Thesis, Missouri University of Science and Technology - 2012). Στην εν λόγω μελέτη εξετάζεται η επενέργεια του νερού στην εμφάνιση ατελούς έκρηξης στην περίπτωση δυναμίτιδας και εκρηκτικού γαλακτώματος. Το πέτρωμα στο οποίο διεξήχθησαν οι δοκιμές αποτελείτο κατά βάση από δολομίτη, η διάμετρος των διατρημάτων ήταν 38 mm, και χρησιμοποιήθηκαν φυσίγγια διαμέτρου 32mm. Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι, εν τη απουσία νερού, προκειμένου να αποφευχθεί απευαισθητοποίηση στην περίπτωση του γαλακτώματος, η απόσταση μεταξύ των διατρημάτων πρέπει να είναι κατά 2,5 φορές μεγαλύτερη της διαμέτρου τους. Στην περίπτωση της δυναμίτιδας, για να αποσοβηθεί συμπαθητική ενεργοποίηση, η απόσταση ανάμεσα στα διατρήματα πρέπει να είναι ακόμη μεγαλύτερη, περίπου τριπλάσια της διαμέτρου τους. Παρουσία νερού η απόσταση αυξάνεται ακόμη περισσότερο, συγκεκριμένα περί το 45% σε σχέση με εκείνη που θα πρέπει να έχουν τα διατρήματα μεταξύ τους απόντος νερού.

Ατελής λειτουργία πυροκροτητή

Το ωστικό κύμα που παράγεται από την έκρηξη μία εκρηκτικής ύλης επιδρά αρνητικά στην απόδοση όχι μόνο του εκρηκτικού που βρίσκεται σε παρακείμενο διάτρημα αλλά και του πυροκροτητή που έχει τοποθετηθεί εκεί για την έναυση του τελευταίου. Μάλιστα, όλες οι προαναφερθείσες παράμετροι του σχεδιασμού της ανατίναξης που σχετίζονται με την αποτελεσματικότητα των εκρηκτικών υλών, επηρεάζουν αντίστοιχα και τη λειτουργία των μέσων έναυσης. Κατά συνέπεια, αν δεν ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα, η απόδοση των πυροκροτητών μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ πλήρους έκρηξης και αφλογιστίας. Όμως, η μειωμένη απόδοση του πυροκροτητή μπορεί να έχει αρνητικό αντίκτυπο στην αποτελεσματική διέγερση της εκρηκτικής ύλης, άρα και στην τελεσφόρα (υπό την έννοια της έκλυσης της μέγιστης δυνατής ενέργειας) έκρηξή της.

Επιπλέον, πέραν της κύριας γόμωσης (η οποία σχετίζεται με την αποτελεσματικότητα της έναυσης) του πυροκροτητή, από την δράση των κυμάτων που αναπτύσσονται από γειτονικά γεμίσματα επηρεάζεται η πορεία της αντίδρασης του στοιχείου καθυστέρησης, με συνέπεια να μεταβάλλεται ο χρόνος δράσης του πυροκροτητή. Έτσι όμως αυξάνεται η διασπορά και υπάρχει κίνδυνος επικάλυψης στην περίπτωση

χρήσης πυροκροτητών διαδοχικών χρόνων καθυστέρησης (δηλαδή ένας πυροκροτητής με υψηλότερο διαδοχικό αριθμό εκτονώνεται πριν από έναν με χαμηλότερο διαδοχικό αριθμό), βγάζοντας εκτός της πρόβλεψης την αλληλουχία των εκρήξεων, γεγονός με δυσμενείς συνέπειες για την αποδοτικότητα της εξορυκτικής διαδικασίας.

Επειδή η συμπεριφορά των πυροκροτητών απέναντι στα παραγόμενα, από τα γειτνιαζόμενα διατρήματα, ωστικά κύματα εξαρτάται από την αντοχή τους σε κρούση, οι πρώτες μελέτες που διεξήχθησαν επί του θέματος περιλάμβαναν τέτοιου τύπου δοκιμές (impact tests). Βρέθηκε λοιπόν ότι για να εκτονωθούν οι συνήθεις πυροκροτητές (ηλεκτρικοί και μη), απαιτούνται 60-78 Nm. Αντίστοιχες τιμές βρέθηκαν και για την ακούσια έναυση του σωλήνα (shocktube) των μη-ηλεκτρικών πυροκροτητών (Nonel). Ουσιαστικά, η έναυση του πυροκροτητή θα προκύψει μέσω εφαρμογής πίεσεως, αν και εφόσον εφαρμοστεί πίεση υψηλότερη από αυτή που απαιτείται για την ενεργοποίηση της (ευαίσθητης) κύριας γόμωσης (PETN) που βρίσκεται στην βάση του. Επειδή όμως τα κρουστικά κύματα που αναπτύσσονται είναι μεγάλα, και επειδή η μάζα και η ταχύτητα των λίθων που εκτοξεύονται κατά την έκρηξη (και μπορεί να προσκρούσουν στους σωλήνες των Nonel) είναι επίσης μεγάλες, συνήθως η ελάχιστη πίεση ενεργοποίησης του πυροκροτητή υπερκεράζεται.

Η πίεση που υφίσταται ο πυροκροτητής είναι αποτέλεσμα της επίδρασης του κύματος που παράγεται από γειτονικές εκρήξεις, όπως αυτό οδεύει εντός της εκρηκτικής ύλης, στην οποία ο πυροκροτητής είναι εισηγμένος. Η εκτίμηση, επομένως, του αντίκτυπου των γειτνιαζόντων εκρήξεων στον πυροκροτητή είναι πολύπλοκότερη από εκείνη στην περίπτωση των εκρηκτικών υλών, καθότι εκτός από τα εδαφολογικά χαρακτηριστικά, την παρουσία νερού, την διάμετρο των διατρημάτων, το είδος και την ποσότητα του εκρηκτικού-δότη, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και το είδος του εκρηκτικού-δέκτη, στο οποίο έχει εισαχθεί ο πυροκροτητής. Οι Smith και Eck διερευνήσαν την επίδραση του είδους του εκρηκτικού-δότη, όπως επίσης και της επενέργειας του φαινομένου του υδραυλικού πλήγματος στην απόδοση του πυροκροτητή. Τα πορίσματα της ερευνάς του έχουν περιληφθεί το άρθρο τους με τίτλο: 'Detonator Malfunctions - Emulsion Sensitizer Effects' (Proc. of the 32th Annual Conference on Explosives and Blasting Technique, Dallas, 2006), και χαρακτηριστικές φωτογραφίες παρατίθενται ακολούθως (εικόνα 3). Συγκεκριμένα,

χρησιμοποίησαν εκρηκτικά γαλακτώματα με διαφορετικό μέσο ενεργοποίησης, και αποφάνθησαν ότι τα γυάλινα μικροσφαιρίδια σε αντίθεση με τα πλαστικά, έχουν την τάση να αμβλύνουν τον αντίκτυπο της έκρηξης του εκρηκτικού-δότη στον πυροκροτητή, ελαττώνοντας την πιθανότητα για συμπαθητική ενεργοποίησή του τελευταίου.



α)



β)



γ)

Εικόνα 3: Αποτέλεσμα γεινιάζουσας έκρηξης σε πυροκροτητή εισηγμένου σε: α) Νερό, β) γαλάκτωμα ευαισθητοποιημένου με γυάλινα μικροσφαιρίδια, και γ) γαλάκτωμα ευαισθητοποιημένου πλαστικά μικροσφαιρίδια

Επίλογος

Ο κατάλογος των επιπτώσεων που μπορεί να προκύψουν από μία προβληματική ανατίναξη είναι μακροσκελής και δεν αφορά μόνο της οικονομικές πτυχές της διαδικασίας. Εγείρονται σοβαρά ζητήματα ασφάλειας. Κατά συνέπεια, η χρήση εκρηκτικών υψηλής ποιότητας και αξιοπιστίας είναι κεφαλαιώδους σημασίας. Η απόδοση όμως των εκρηκτικών είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τον τρόπο που αυτά χρησιμοποιούνται. Πρέπει, λοιπόν, να λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό οι παράμετροι που επηρεάζουν την απόδοση των εκρηκτικών, διαφορετικά είναι πολύ πιθανή η εμφάνιση των φαινομένων που αναφέρθηκαν ανωτέρω, της απευαισθητοποίησης, της συμπαθητικής έναυσης, και του υδραυλικού πλήγματος.

Επιλεκτική βιβλιογραφία

1. M.S. Wieland, The Desensitization and Malfunction of Coal-Mine Explosives, Proc. 13th Annual Conference on Explosives and Blasting Techniques, Cleveland, 1987.
2. A. Ghorbani, The Study of Explosives Malfunction in Parallel Charges, Queen's University Kingston, Canada, 1997

3. K. Ishikawa et al., Study on the Shock Sensitivity of an Emulsion Explosive by the Sand Gap Test, Science and Technology of Energetic Materials, 199-204, 2006.
4. C. Smith, G. Eck, Detonator Malfunctions - Emulsion Sensitizer Effects, Proc. of the 32th Annual Conference on Explosives and Blasting Technique, Dallas, 2006.
5. A.M Doerfler, The effects of water on sympathetic detonation and dead pressing of dynamite and emulsions, Master Thesis, Missouri Univeristy of Science and Technology, 2012.

Παντελής Κοίλιαρης,
Χημικός Μηχανικός (PhD)
Διευθυντής Παραγωγής Extraco SA

Γιώργος Μπάντσης,
Μηχανικός Επιστήμης Υλικών (MSc, PhD)
Υπεύθυνος Παραγωγής Γαλακτωμάτων -
Πυροκροτητών Extraco SA