

## Ωστικό κύμα προερχόμενο από χημική έκρηξη: Υπολογισμός ταχύτητας των θραυσμάτων και εκτίμηση απόστασης ασφαλείας

Γιώργος Π. Κουρόπουλος

Πτυχιούχος Μηχανικός Ενεργειακής Τεχνολογίας ΤΕΙ Αθήνας  
E – mail: etmecheng@gmail.com

### Περίληψη

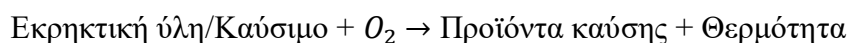
Στην συγκεκριμένη μελέτη θα εξεταστεί η απόσταση που πρέπει να λαμβάνεται για την προστασία ανθρώπων και κτιρίων από το ωστικό κύμα που προκαλείται από μια χημική έκρηξη. Επιπροσθέτως θα αναφερθούν σχέσεις για τον προσεγγιστικό υπολογισμό της ταχύτητας των θραυσμάτων ενός εκρηκτικού μηχανισμού σε περίπτωση που αυτός εκραγεί. Η κύρια πηγή πληροφοριών της μελέτης είναι τα διεθνή πρότυπα οργανισμών και φορέων σχετιζόμενων με την πυροτεχνουργική και την προστασία από εκρηκτικά, καθώς και τα άρθρα διαφόρων ερευνητών. Από την διερεύνηση της βιβλιογραφίας προκύπτει πως υπάρχουν αρκετές μαθηματικές σχέσεις οι οποίες δίνουν εμπειρικές αριθμητικές συσχετίσεις μεταξύ των ζητούμενων μεγεθών και διαφόρων άλλων παραμέτρων.

**Λέξεις κλειδιά:** Ωστικό κύμα, ταχύτητα θραυσμάτων, απόσταση ασφαλείας, προστασία από έκρηξη

### Εισαγωγή

Η έκρηξη είναι μια διεργασία κατά την οποία συμβαίνει ταχεία φυσική ή χημική μεταβολή ενός συστήματος με την παραγωγή μηχανικού έργου και υπό την παρουσία απότομης αλλαγής της ενέργειας (Baum et al., 1963). Από την μελέτη της βιβλιογραφίας διαπιστώνεται ότι δεν υπάρχει κάποιος ακριβής ορισμός του φαινομένου της έκρηξης, αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι υπάρχουν πολλά είδη εκρήξεων καθώς και ότι πολλοί επιστήμονες σκέφτονται αν θα πρέπει ο ορισμός να επικεντρώνεται στο αίτιο της έκρηξης ή στο αποτέλεσμα και την συνέπεια της έκρηξης. Οι περισσότεροι ορισμοί συγκλίνουν στο αποτέλεσμα της έκρηξης και όχι στο αίτιο πρόκλησής της, ως αποτέλεσμα της έκρηξης θεωρείται η πολύ γρήγορη απελευθέρωση ενέργειας και αερίων (Conkling, 1985; Kosanke, 1990). Οι εκρήξεις χωρίζονται σε πολλά είδη, πιο συγκεκριμένα μια έκρηξη μπορεί να είναι φυσική, αστρική, χημική, πυρηνική, ηλεκτρική, μαγνητική, μηχανική έκρηξη ή έκρηξη ατμού. Η συγκεκριμένη μελέτη πραγματεύεται μόνο τις χημικές εκρήξεις.

Κατά την διεργασία της χημικής έκρηξης, συμβαίνει μια ταχεία χημική αντίδραση με την ταυτόχρονη απελευθέρωση θερμότητας, υπάρχει βίαιη εκτόνωση αερίων και αναθυμιάσεων ενώ δημιουργείται ωστικό κύμα (AMCR, 1964). Η χημική έκρηξη, συντελείται σύμφωνα με την παρακάτω αντίδραση:

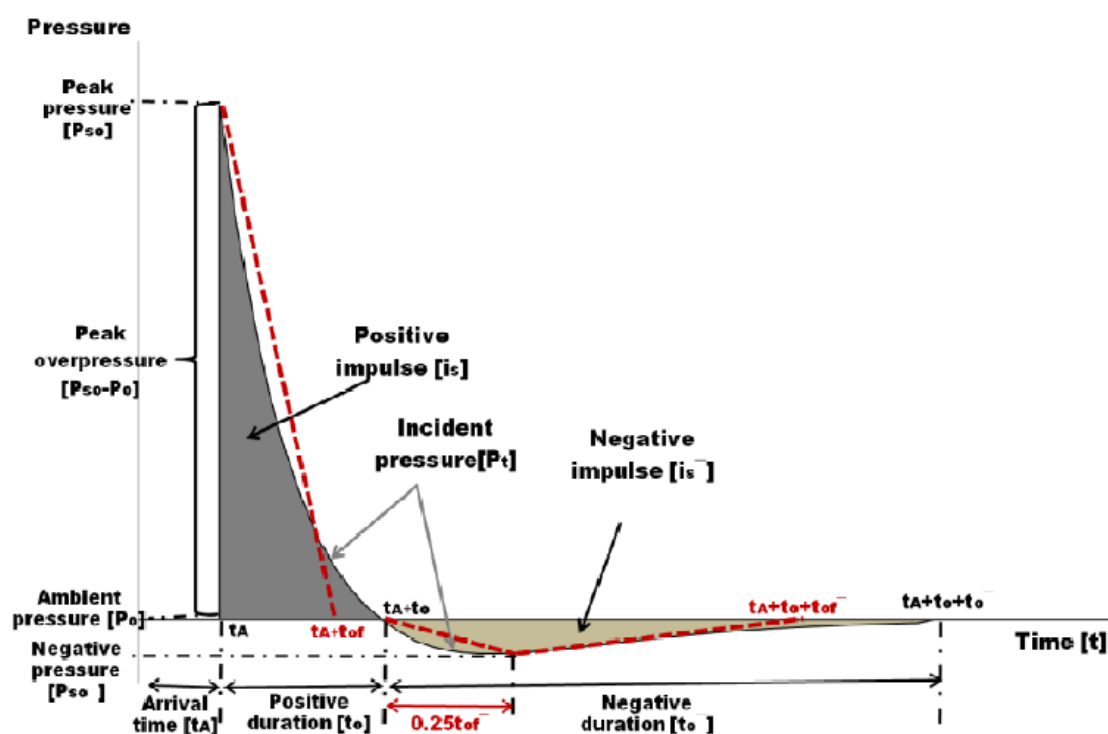


Η χημική έκρηξη συντελείται σε τρία στάδια τα οποία έχουν διαφορετική ταχύτητα το καθένα. Το πρώτο στάδιο είναι η καύση με ταχύτητα της τάξης των cm/sec, το δεύτερο

η ανάφλεξη με ταχύτητες της τάξης των dm/sec και το τρίτο η έκρηξη με ταχύτητες km/sec (Kosanke, 1990). Οι εκρήξεις που συμβαίνουν από την καύση εύφλεκτων υλικών ή εκρηκτικών υλών ανήκουν όλες στις χημικές εκρήξεις.

### Ωστικό κύμα

Το ωστικό κύμα είναι μια διαταραχή η οποία λαμβάνει χώρα στην ατμόσφαιρα και γενικότερα στο μέσον στον οποίο συντελείται η έκρηξη και διαδίδεται φυγόκεντρα με σφαιρική συμμετρία. Το βασικό γνώρισμα του ωστικού κύματος είναι η απότομη αύξηση της πίεσης εντός του σφαιρικού χώρου που περικλείει την έκρηξη (Λιόλιος, 1999). Στα περισσότερα είδη εκρήξεων όπως και κατά την διάρκεια της χημικής έκρηξης, δημιουργείται ωστικό κύμα.



Εικόνα 1. Η μεταβολή της πίεσης σε σχέση με τον χρόνο αμέσως μετά την έκρηξη.

Στην Εικόνα 1 (Karlos and Solomos, 2013), φαίνεται η διακύμανση της πίεσης συναρτήσει του χρόνου αμέσως μετά την έκρηξη. Βλέπουμε πως η πίεση αυξάνεται ακαριαία μέχρι να μεγιστοποιηθεί και μετά μειώνεται απότομα μέχρι να φτάσει στο ελάχιστο όπου έχουμε υποπίεση, στο επόμενο χρονικό διάστημα η πίεση εξισώνεται με την ατμοσφαιρική, εκείνο το διάστημα έχει παρέλθει πλέον η διαταραχή λόγω της έκρηξης. Η χρονολογική μεταβολή της πίεσης κατά την έκρηξη, διέπεται από την εξίσωση του Friedlander (Baker, 1973):

$$P_S(t) = P_{SO} \left(1 - \frac{t}{t_0}\right) \exp\left(-b \frac{t}{t_0}\right) \quad (1)$$

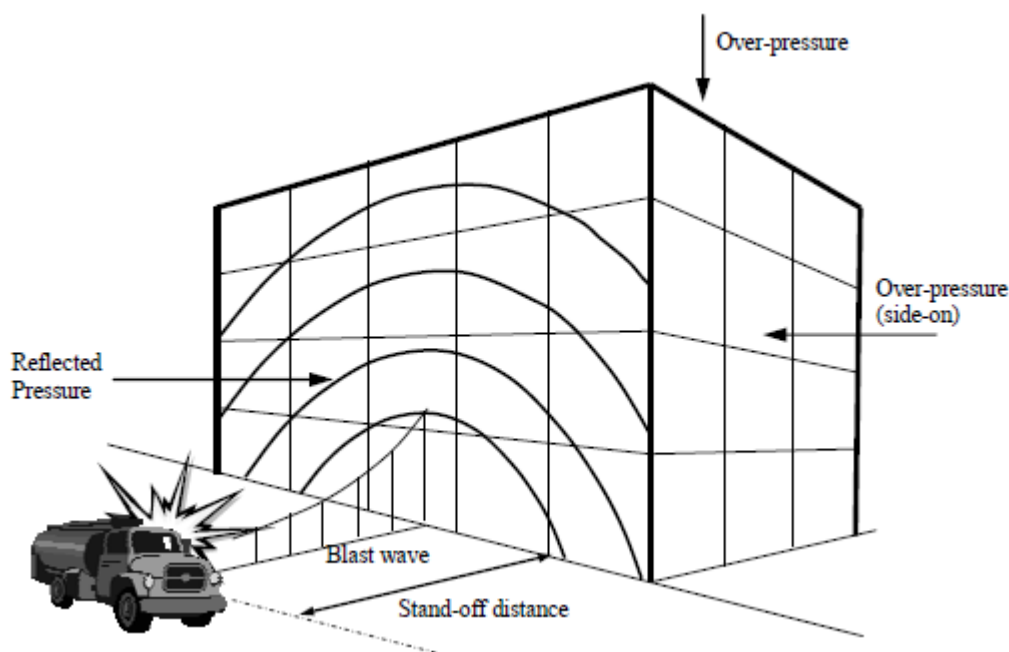
Όπου,  $P_{SO}$ : Η μέγιστη πίεση του περιβάλλοντος χώρου μετά την έκρηξη.  
 $t_0$ : Ο χρόνος στον οποίον μηδενίζεται η πίεση.

$P_0$ : Πίεση του περιβάλλοντος χώρου πριν την έναρξη της έκρηξης.

b: Συντελεστής απόσβεσης της κυματομορφής ο οποίος προσδιορίζεται πειραματικά μέσω μη γραμμικής παλινδρόμησης κατά την εξαγωγή μιας καμπύλης μεταβολής της πίεσης ως προς τον χρόνο (Karlos and Solomos, 2013).

Η μέγιστη πίεση αντανάκλασης  $P_r$  η οποία ασκείται στην επιφάνεια ενός στόχου που βρίσκεται εντός του ωστικού κύματος που περικλείει την έκρηξη και σε ευθεία απόσταση R από την πηγή του ωστικού κύματος, ισούται με:

$$P_r = 2P_0 \left( \frac{4P_{SO} + 7P_0}{P_{SO} + 7P_0} \right) \quad (2)$$



Εικόνα 2.  $P_r$ : Reflected pressure,  $P_{SO}$ : Overpressure side-on, Stand-off distance: Ελάχιστη απόσταση ασφαλείας από το ωστικό κύμα της έκρηξης (Ngo et al., 2007).

### Ταχύτητα θραυσμάτων

Η αρχική ταχύτητα που αποκτούν τα θραύσματα από το ωστικό κύμα αμέσως μετά την έκρηξη, μπορεί να εκτιμηθεί από τις εξισώσεις του R. Gurney για εκρηκτικούς μηχανισμούς το σχήμα των οποίων έχει σφαιρικό ή κυλινδρικό όγκο (Gurney, 1943; IATG, 2015). Οι εξισώσεις του Gurney δεν υπολογίζουν την ταχύτητα σε μονάδες στο SI σύστημα, αλλά δίνουν έναν αδιάστατο αριθμό ο οποίος συσχετίζει την ταχύτητα του θραύσματος ως προς την σταθερά Gurney. Υπάρχουν και εξισώσεις για πιο σύνθετους μηχανισμούς και διατάξεις, όπως οι σχέσεις του Hirsch για εκρηκτικούς μηχανισμούς τύπου «σάντουιτς», επίπεδου τύπου, συμμετρικές και ασύμμετρες διατάξεις ή κύλινδρος με δύο στρώσεις εκρηκτικού υλικού (Hirsch, 1995).

$$\text{Κυλινδρική διάταξη} \quad \frac{v}{\sqrt{2E}} = \left( \frac{m_f}{m_{exp}} + \frac{1}{2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$\text{Σφαιρική διάταξη} \quad \frac{v}{\sqrt{2E}} = \left( \frac{m_f}{m_{exp}} + \frac{3}{5} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (4)$$

Όπου:

$m_f$ : Η μάζα του εξωτερικού περιβλήματος του εκρηκτικού μηχανισμού.

$m_{exp}$ : Η συνολική μάζα της εκρηκτικής ύλης εντός του περιβλήματος της διάταξης.

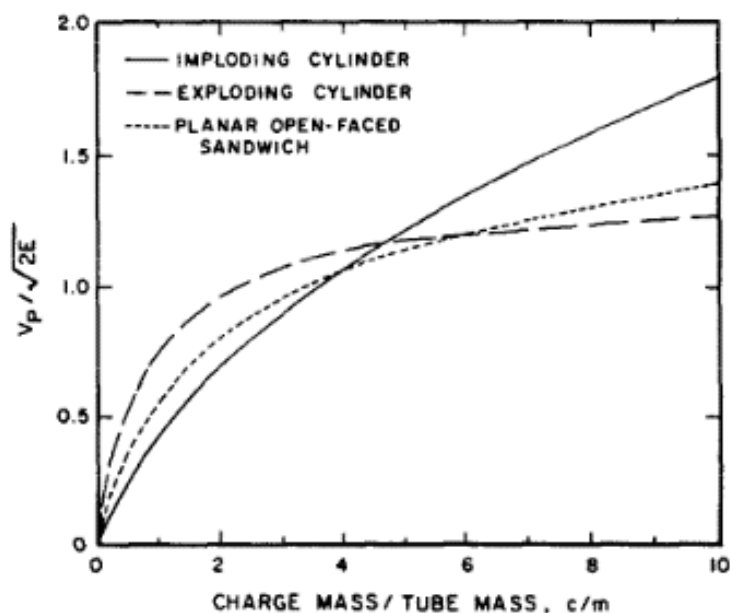
$\sqrt{2E}$ : Η σταθερά Gurney, εξαρτάται από το είδος της εκρηκτικής ύλης και την πυκνότητά της.

Πίνακας 1. Σταθερά Gurney για διάφορες εκρηκτικές ύλες

Εκρηκτική ύλη	$\sqrt{2E}$ mm/μs (Cooper, 1996)	$\sqrt{2E}$ mm/μs (IATG, 2015)
Composition B	2.70	2.774
Composition C3	2.68	–
Composition C4	–	2.53
HMX	2.80	2.972
Octol 75/25	2.80	2.896
LX-14	2.97	–
PBX 9404	2.90	–
PBX 9502	2.377	–
PETN	2.93	2.926
RDX	2.83	2.926
RDX/TNT 60/40	–	2.402
Tetryl	2.50	2.499
Tritonal	2.32	2.316
TNT	2.44	2.438

Πίνακας 2. Ταχύτητα οπτικού κύματος του εκρηκτικού ANFO για διάφορες τιμές πυκνότητας εκρηκτικής ύλης (Sanchidrian, 2015).

Είδος ANFO	Πυκνότητα (Kg/m <sup>3</sup> )	Ταχύτητα (m/s)
Lambrit	776	4084
Prilit A	850	3854
Nagolita	902	4426
Alnafo (ANFO/A1)	910	4193
A-U-50	830	3233
A-U-100	830	3879
Titan 6000-E1	890	4688
Titan 6000-E6	1130	6031
Titan 6080-E4	750	4131
Titan 6080-E3	810	4236
Titan 6080-E12	1140	5573
Titan 6080-E7	1260	5270



Εικόνα 3. Η μεταβολή της ποσότητας  $v/\sqrt{2E}$  ως προς τον λόγο  $m_f/m_{exp}$  για διάφορα περιβλήματα κυλίνδρου (Meyers and Wang, 1988).

Οι εξισώσεις (3) και (4) λυμένες ως προς την μεταβλητή  $v^2$  έρχονται στην μορφή Gurney-Lagrange η οποία προτάθηκε από τον Defourneaux. Από την βιβλιογραφική έρευνα, υπάρχουν αποκλίσεις στις τιμές του μεγέθους  $\sqrt{2E}$ , οι τιμές της σταθεράς Gurney αναθεωρούνται κατά διαστήματα ενώ υπάρχουν και σφάλματα στρογγυλοποίησης (Jacobs, 1974).

### Εκτίμηση απόστασης ασφαλείας

Η απόσταση ασφαλείας (stand-off distance), είναι η ελάχιστη απόσταση που πρέπει να λαμβάνεται ώστε το φωστικό κύμα της έκρηξης να μην επηρεάσει κάποιον στόχο, υλικό ή ανθρώπινο. Η απόσταση αυτή είναι ένα σημαντικό στοιχείο που απασχολεί τις αρμόδιες αρχές κατά την εξουδετέρωση ενός εκρηκτικού μηχανισμού ή κατά την δοκιμή μιας βόμβας. Η απόσταση ασφαλείας στην περίπτωση εξουδετέρωσης εκρηκτικών μηχανισμών, προσδιορίζεται από τις παρακάτω εξισώσεις (IATG, 2015):

$$\text{Ελεύθερη πρόσβαση σε πεδίο κατάρρευσης κτιρίων} \quad d = 634\sqrt[5]{m} \quad (5)$$

$$\text{Απαγορευμένη πρόσβαση σε πεδίο κατάρρευσης κτιρίων} \quad d = 444\sqrt[5]{m} \quad (6)$$

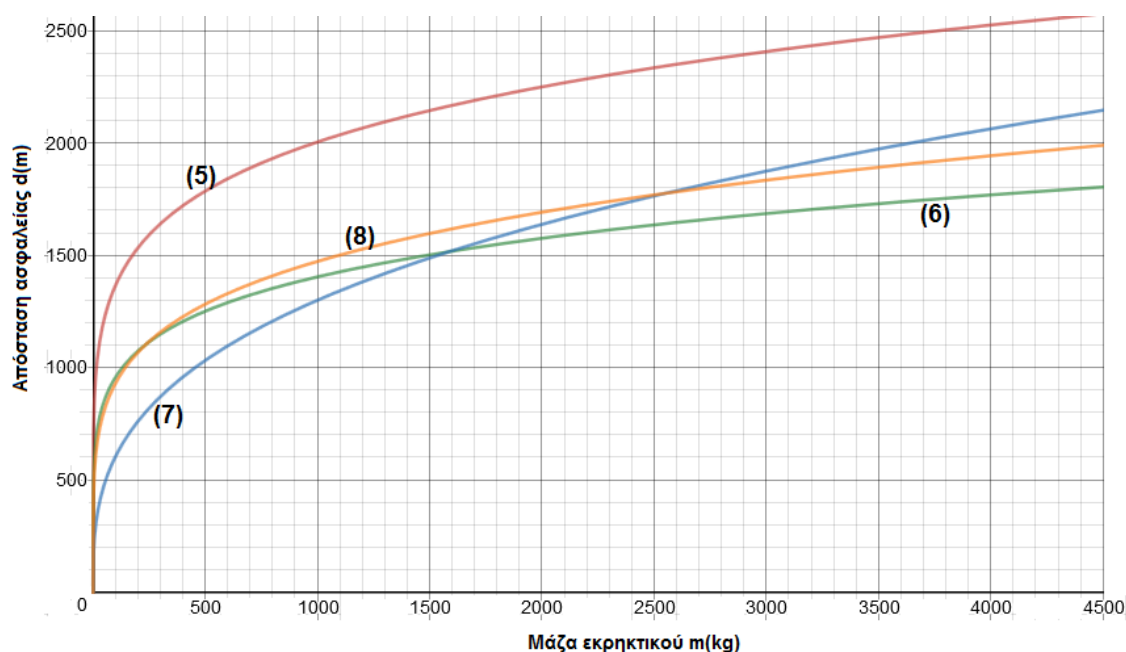
$$\text{Εκρηκτικοί μηχανισμοί χωρίς περίβλημα, απουσία θραυσμάτων} \quad d = 130\sqrt[5]{m} \quad (7)$$

m: Η συνολική μάζα του εκρηκτικού μηχανισμού μαζί με την ύλη σε kg.

d: Η απόσταση ασφαλείας σε m.

Οι εξισώσεις (5) ως (7) εφαρμόζονται στην περίπτωση που η έκρηξη συμβαίνει σε ανοιχτό χώρο εκτός κτιρίου και άλλων δομικών κατασκευών, επίσης οι εξισώσεις αφορούν την «γρήγορη» λήψη μέτρων ασφαλείας σε σύντομο χρονικό διάστημα. Εναλλακτικές σχέσεις για τον προσδιορισμό της απόστασης ασφαλείας στην περίπτωση της κατάρρευσης κτιρίων με εκρηκτικά, έχουν αναπτυχθεί από τον Αυστραλιανό Οργανισμό Αμυντικής Επιστήμης και Τεχνολογίας (IATG, 2015; Jones and Kemister, 1997).

$$d = 370 \sqrt[5]{m} \quad (8)$$



Εικόνα 4. Η μεταβολή της απόστασης ασφαλείας ως προς την μάζα εκρηκτικού.

Γενικότερα διαπιστώνεται ότι η μεταβολή της απόστασης ασφαλείας ως προς την μάζα του εκρηκτικού μηχανισμού είναι μια συνάρτηση της μορφής  $y=a\sqrt{x}$ . Οι μεταβολές των εξισώσεων (5) ως (8) παρουσιάζονται στην Εικόνα 4. Πέραν των παραπάνω μαθηματικών σχέσεων, η απόσταση ασφαλείας που πρέπει να λαμβάνεται από την έκρηξη βομβών, μπορεί να εκτιμηθεί και από τον Πίνακα 3 (NCTC, 2006).

Πίνακας 3. Απόσταση ασφαλείας ανάλογα την ισχύ της βόμβας σε eqs. TNT

Χωρητικότητα (Kg) (Ισοδύναμο TNT*)	Απόσταση ασφαλείας για κτίρια (m)	Απόσταση ασφαλείας εκτός κτιρίου (m)
2.3	21	259
23	46	564
227	98	457
454	122	533
1814	183	838
4536	262	1143
13608	378	1981
27216	457	2134

\*1 ισοδύναμο TNT είναι η ενέργεια που εκλύεται από 1 τόνο TNT, 4.184GJ.

Για τον προσδιορισμό της επιθυμητής απόστασης ασφαλείας με βάση την μάζα της εκρηκτικής ύλης σε ισοδύναμο TNT από τον παραπάνω πίνακα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η γραμμική παρεμβολή.

#### Αριθμητική εφαρμογή

Εκρηκτικός μηχανισμός αποτελούμενος από 20Kg ANFO και με εξωτερικό περίβλημα 1.5Kg, βρίσκεται εκτεθειμένος σε δρόμο εντός πυκνοκατοικημένης περιοχής. Η εκρηκτική ύλη βρίσκεται εντός κυλινδρικής διάταξης. Να βρεθεί η ταχύτητα θραυσμάτων σε περίπτωση έκρηξης της βόμβας, η απόσταση ασφαλείας που πρέπει να ληφθεί στην περίπτωση εξουδετέρωσης του μηχανισμού και με απαγορευμένη την πρόσβαση σε ανθρώπους. Επίσης να βρεθεί η απόσταση ασφαλείας που πρέπει να ληφθεί για την προστασία κτιρίων ή ανθρώπων στην περίπτωση που μπορεί να εκραγεί ο μηχανισμός.

Η σταθερά Gurney για την εκρηκτική ύλη ANFO είναι,  $\sqrt{2E} = 2769\text{m/sec}$ , (Kinney and Graham, 1985).

Από την σχέση (3) για την ταχύτητα θραυσμάτων έχουμε:

$$v = \sqrt{2E} \left( \frac{m_f}{m_{exp}} + \frac{1}{2} \right)^{-\frac{1}{2}} = 2769\text{m/sec} \left( \frac{1.5\text{Kg}}{20\text{Kg}} + \frac{1}{2} \right)^{-\frac{1}{2}} = 2099.7\text{m/sec}$$

Για την απόσταση ασφαλείας που πρέπει να ληφθεί στην περίπτωση εξουδετέρωσης του μηχανισμού στο συγκεκριμένο μέρος απουσία ανθρώπων εφαρμόζεται η σχέση (6):

$$d = 444 \sqrt[6]{21.6\text{Kg}} = 740.95\text{m}$$

Η απαιτούμενη απόσταση ασφαλείας για κτίρια και ανθρώπους στην περίπτωση έκρηξης, προσδιορίζεται από τον Πίνακα 3 εφόσον γνωρίζουμε σε πόσα ισοδύναμα TNT αντιστοιχούν τα 20Kg ANFO. Το ANFO με μέση πυκνότητα  $854 \text{ Kg/m}^3$  έχει μια μέση έκλυση θερμότητας  $4095 \text{ kJ/Kg}$  (Sanchidrian et al., 2015), άρα τα 20Kg εκλύουν  $81.9 \text{ MJ}$  θερμότητας. Εφόσον τα 1000Kg TNT εκλύουν  $4184 \text{ MJ}$  θερμικής ενέργειας,  $19.6 \text{ Kg}$  ισοδύναμου TNT. Από τον Πίνακα 3 με γραμμική παρεμβολή έχουμε:

Απόσταση ασφαλείας για κτίρια:

$$\frac{23 - 2.3}{23 - 19.6} = \frac{46 - 21}{46 - d} \Leftrightarrow \frac{20.7}{3.4} = \frac{25}{46 - d} \Leftrightarrow d = 41.9\text{m}$$

Απόσταση ασφαλείας για ανθρώπους:

$$\frac{23 - 2.3}{23 - 19.6} = \frac{564 - 259}{564 - d} \Leftrightarrow \frac{20.7}{3.4} = \frac{305}{564 - d} \Leftrightarrow d = 513.9\text{m}$$



Διαπιστώνεται ότι υπάρχουν αποκλίσεις μεταξύ ορισμένων αποτελεσμάτων, όπως η απόσταση ασφαλείας για ανθρώπους που είναι χαμηλότερη έναντι της αποστάσεως ασφαλείας που πρέπει να ληφθεί με απαγορευμένη την πρόσβαση σε ανθρώπους.

### Συμπεράσματα

Στην συγκεκριμένη εργασία έγινε αναφορά των μαθηματικών σχέσεων για τον προσδιορισμό της ταχύτητας θραυσμάτων μετά από μια χημική έκρηξη καθώς και την εκτίμηση των αποστάσεων ασφαλείας που πρέπει να λαμβάνονται. Καταβλήθηκε προσπάθεια για την παράθεση των σχέσεων και την υποστήριξη των πληροφοριών όσο το δυνατόν περισσότερο στηριζόμενοι στην επιστημονική βιβλιογραφία. Ένα γενικό συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι οι περισσότερες σχέσεις για τον προσδιορισμό μεγεθών, προκύπτουν με ανάλυση παλινδρόμησης, αυτό όπως είναι φυσικό δίνει προσεγγιστικά αποτελέσματα με ένα σφάλμα.

### Βιβλιογραφία

1. Baker, W.E. (1973). *Explosions in air*, University of Texas Press, Austin TX USA.
2. Baum, F.A., Stanyukovich, K.P. and Shekhter, B.I. (1963). *Physics of an explosion*, U.S. Army Engineer Research and Development Laboratories, Department of the Army Corps of Engineers.
3. Conkling, J.A. (1985). *The Chemistry of Pyrotechnics*, Marcel Dekker.
4. Jacobs, S.J. (1974). *The Gurney formula: Variations on a theme by Lagrange*, National Technical Information Service (NTIS), Defense Technical Information Center. Available from internet <http://dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/783941.pdf>
5. Jones, D.A. and Kemister, D. (1997). *Safety distance calculations for multi-item fragmenting munitions*, DSTO-TR-0505, Defense Science and Technology Organization.
6. Engineering Design Handbook. (1964). *Elements of armament engineering Part 1*, Sources of energy, Headquarters US, Army Materiel Command (AMCR), Defence Technical Information Center. Available from internet <http://dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/830272.pdf>
8. Gurney, R.W. (1943). *The initial velocities of fragments from bombs, shells, and grenades*, BRL-405, Ballistic Research Laboratory, Aberdeen, Maryland.
9. Hirsch, E. (1995). *On the inconsistency of the asymmetric-sandwich Gurney formula when used to model thin plate propulsion*, Propellants, Explosives. Pyrotechnics, 20(4): pp. 178-181.
10. International Ammunition Technical Guideline 01.80.2015. *Formulae for ammunition management*, Second edition.
11. Karlos, V. and Solomos, G. (2013). *Calculation of blast loads for application to structural components*, JRC Technical Reports, Administrative Arrangement No JRC 32253-2011 with DG-HOME Activity A5 - Blast Simulation Technology Development.
12. Kinney, G.F. and Graham, K.J. (1985). *Explosive shocks in air, Second Edition*, Springer Science, New York.
13. Kosanke, B.J. and Kosanke, K.L. (1980). *Introduction to the physics and chemistry of low explosives (Part 1)*, Pyrotechnics Guild International Bulletin, No. 68, 69, 70, pp. 128-130.



14. Kosanke, B.J. and Kosanke, K.L. (1980). *Introduction to the physics and chemistry of low explosives (Part 2)*, Pyrotechnics Guild International Bulletin, No. 68, 69, 70, pp. 130-133.
15. Meyers, M.A. and Wang, S.L. (1988). *An improved method for shock consolidation of powders*, Acta Metali, 36(4): pp. 925-936.
16. National Counterterrorism Center (2005), *Bomb threat stand-off distances*. Available from internet [https://www.nctc.gov/docs/2006\\_calendar\\_bomb\\_stand\\_chart.pdf](https://www.nctc.gov/docs/2006_calendar_bomb_stand_chart.pdf)
17. Ngo, T., Mendis, P., Gupta, A. and Ramsay, J. (2007). *Blast loading and blast effects on structures – An overview*, Electronic Journal of Structural Engineering, Special issue: Loading on structures, pp. 76-91.
18. Sanchidrian, J.A., Castedo, R., Lopez, L.M., Segarra, P. and Santos A.P. (2015). *Determination of the JWL constants for ANFO and emulsion explosives from cylinder test data*, Central European Journal of Energetic Materials, 12(2): pp. 177-194.
19. Technical Note 10.20/01. (2013). *Estimation of explosion danger areas*, International Mine Action Standards.
20. Λιόλιος, Θ.Ε. (1999). *Σημειώσεις πυρηνικών όπλων*, "Αθηνά" Ελληνικό Κέντρο Ελέγχου Όπλων.