

ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΣΕ ΕΚΡΗΞΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΦΟΡΕΩΝ ΜΟΝΑΔΑΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Μιχάλης Αγγελίδης

Πολιτικός Μηχανικός

AMTE A.E.

Αθήνα, Ελλάδα

e-mail: amte@otenet.gr

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

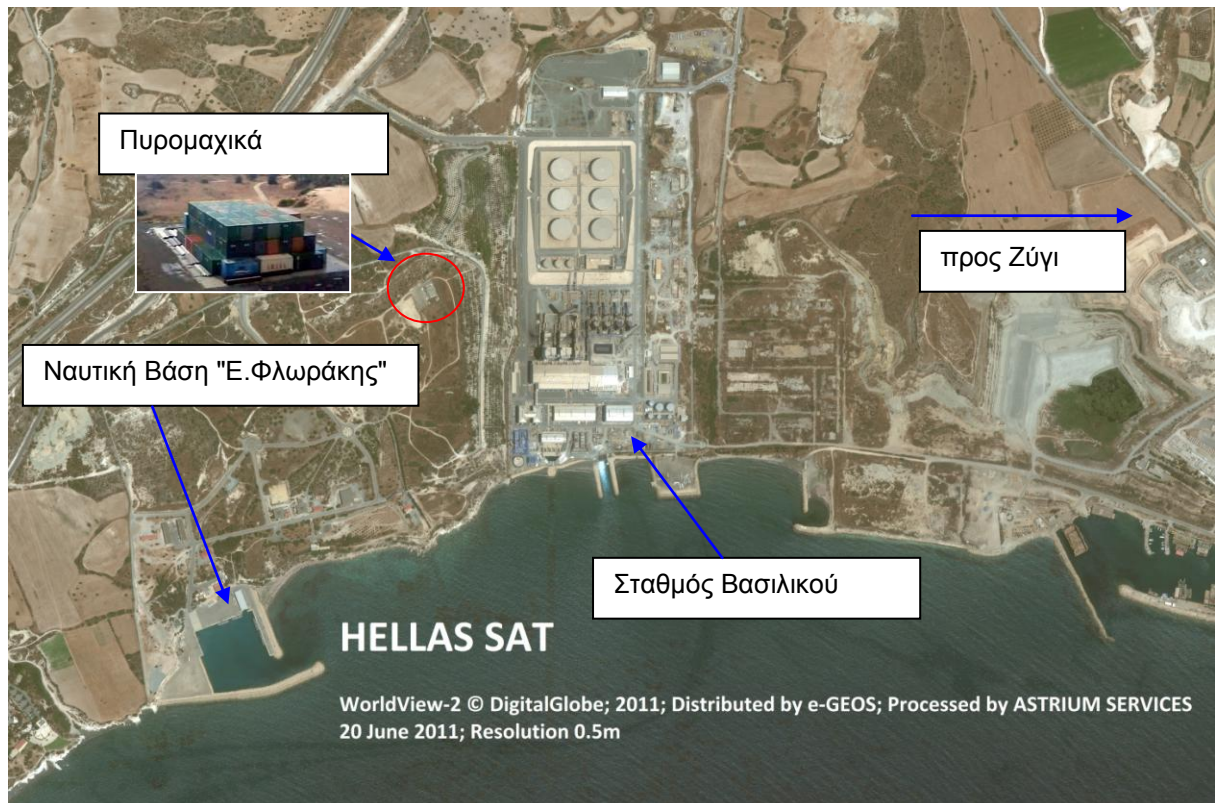
Το καλοκαίρι του 2011 σημειώθηκε ισχυρή έκρηξη σε μονάδα παραγωγής ρεύματος στην Κύπρο. Από την έκρηξη προκλήθηκαν σοβαρές βλάβες στη μονάδα και διεκόπη πλήρως η λειτουργία της. Στην παρούσα εργασία ποσοτικοποιείται η φόρτιση που αντιστοιχεί στην έκρηξη και αξιολογείται η απόκρισή των φορέων. Επισημαίνεται η σημαντική αξία του πλάστιμου σχεδιασμού και παρουσιάζονται παραδείγματα αποκατάστασης.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τις πρώτες πρωινές ώρες της 11ης Ιουλίου 2011 σημειώθηκε έκρηξη στη ναυτική βάση "Ε. Φλωράκης" μεταξύ των χωριών Ζύγι και Ακτή Κυβερνήτου στη νότια πλευρά της Κύπρου (κοντά στη Λεμεσό). Η έκρηξη προκάλεσε το θάνατο 13 ανθρώπων και τον τραυματισμό τουλάχιστον 60. Ο σταθμός παραγωγής ρεύματος του Βασιλικού, που γειτνιάζει με τη ναυτική βάση και αποτελείται από τις Μονάδες 1, 2, 3, 4 (σε φάση λειτουργίας) και από τη Μονάδα 5 (σε φάση δοκιμαστικής λειτουργίας), υπέστη εκτεταμένες ζημιές.

Η έκρηξη προκλήθηκε από αποθηκευμένα πυρομαχικά που είχαν κατασχεθεί από το Κυπριακό Ναυτικό το Φεβρουάριο του 2009. Σύμφωνα με δημοσιεύματα των εφημερίδων, τα πυρομαχικά ήταν αποθηκευμένα σε 98 containers, εκ των οποίων τα 81 περιείχαν εκρηκτικά και τα 17 περιείχαν αδρανές υλικό (βολίδες, εργαλεία, κ.λ.). Σύμφωνα με πληροφορίες που δημοσίευσε η τοπική εφημερίδα "Πολίτης" στις 17.07.2011 ([1]), ένα container είχε επιθεωρηθεί και είχε βρεθεί να περιέχει εκρηκτικά συνολικού βάρους 8340 kg.

Στις ακόλουθες φωτογραφίες από τον δορυφόρο HELLAS SAT αποτυπώνεται η κατάσταση στο σταθμό παραγωγής ρεύματος πριν και μετά την έκρηξη.

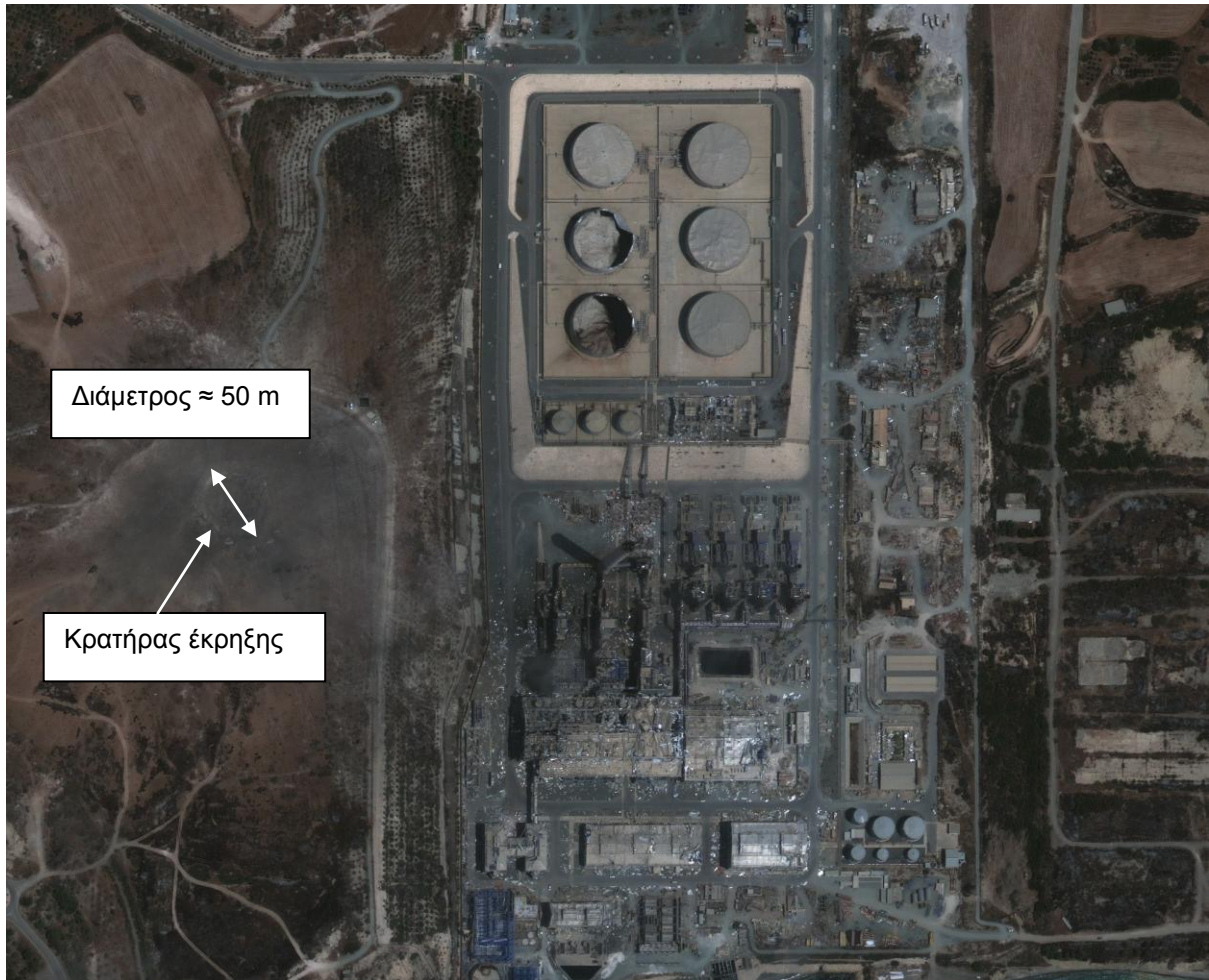


Εικ. 1 Αποψη της περιοχής της Μονάδας πριν από την έκρηξη.

3. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΕΚΡΗΞΗΣ

Από απλή επισκόπηση της φωτογραφίας δορυφόρου μετά την έκρηξη προκύπτει ότι δημιουργήθηκε κρατήρας διαμέτρου περίπου 50 μέτρων. Δημοσίευμα της εφημερίδας "Πολίτης" την 21.07.2011 ([2]) αναφέρει ότι μετρήθηκε διάμετρος κρατήρα 60 μέτρων. Η διάμετρος του κρατήρα σχετίζεται με την εκρηκτική μάζα μέσω εμπειρικών σχέσεων. Χρησιμοποιώντας σχέση που αναφέρεται από τους Kinney & Graham ([3]), διάμετρος κρατήρα 50 μέτρων αντιστοιχεί σε μάζα εκρηκτικών ισοδύναμη με 240 τόνους TNT. Η αντίστοιχη μάζα για διάμετρο κρατήρα 60 μέτρων είναι 420 τόνοι TNT, όπως αναφέρεται στο δημοσίευμα της 21.07.2011 ([2]). Οι Ambrosini & Luccioni ([4]) διερεύνησαν κρατήρες από εκρηκτικά διατεταγμένα σε επίπεδο έδαφος και από τη σχέση που ανέπτυξαν προκύπτει ότι κρατήρας διαμέτρου 50 μέτρων αντιστοιχεί σε ισοδύναμη μάζα εκρηκτικών 670 τόνων TNT. Από τα παραπάνω εκτιμάται ότι η μάζα των εκρηκτικών που προκάλεσαν το ατύχημα κυμαινόταν πιθανά μεταξύ 200 και 700 τόνων TNT. Η τιμή αυτή είναι σημαντική και αυτό προκύπτει από τη σύγκρισή της με άλλες γνωστές εκρήξεις:

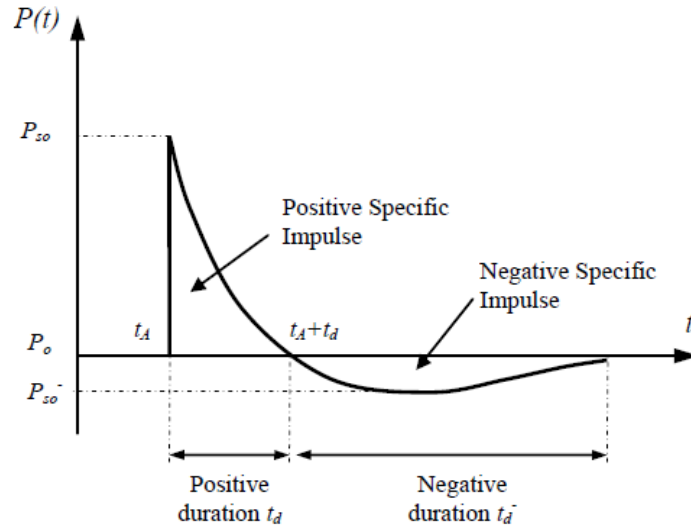
- Hiroshima (1945): 13000 t TNT
- Oklahoma City (1995): 2 t TNT
- Manchester (1996): 1.5 t TNT
- Al-Khabar (1996): 2.5 t TNT



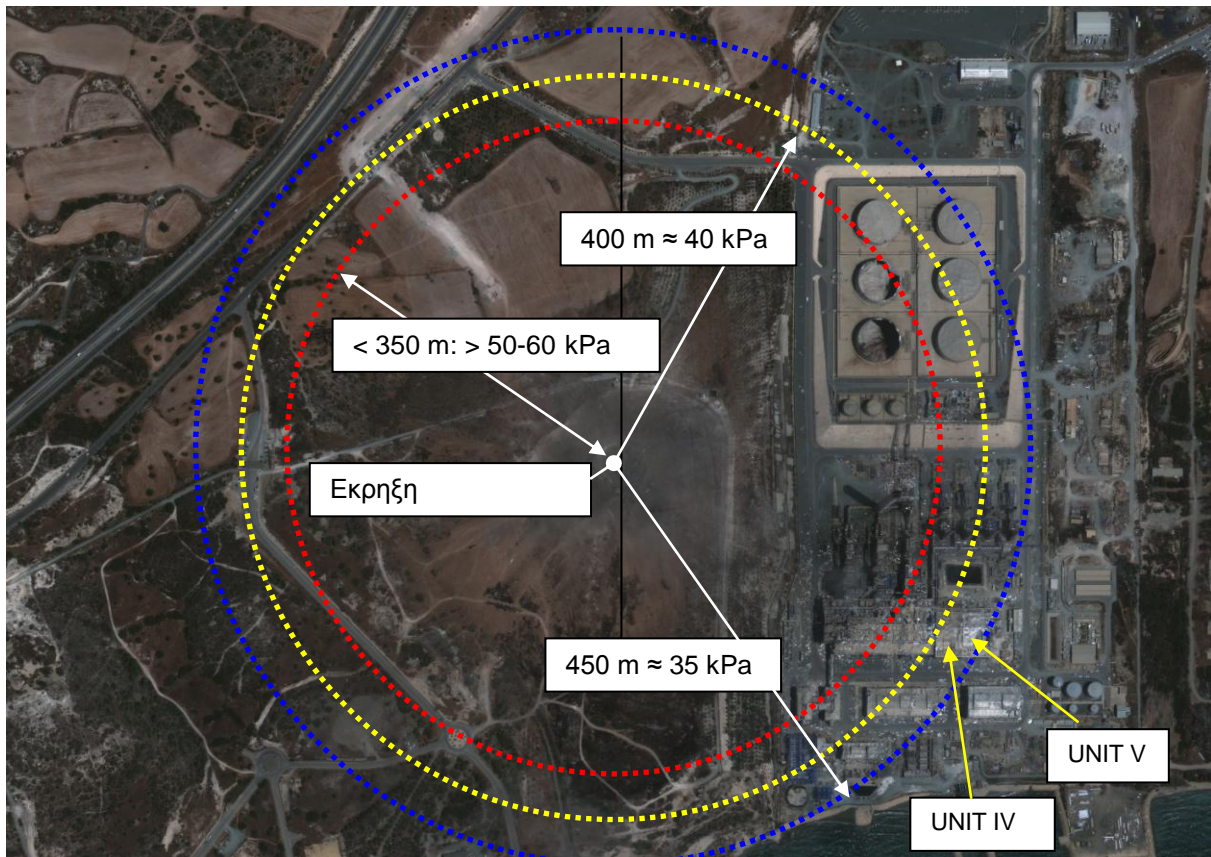
Εικ. 2 Αποψη της περιοχής της Μονάδας μετά την έκρηξη.

Από τη σύγκριση αυτή προκύπτει ότι το μέγεθος της έκρηξης υπερβαίνει τις συνήθεις τρομοκρατικές ενέργειες και τις συμβατικές στρατιωτικές δράσεις που κυμαίνονται συνήθως μεταξύ 1 και 15 τόνων TNT και προσεγγίζει το όριο ισχύος των τακτικών πυρηνικών.

Το επόμενο βήμα είναι η εκτίμηση της φόρτισης επί των κτηρίων. Χρησιμοποιούνται και πάλι εμπειρικές σχέσεις από τη βιβλιογραφία, π.χ. ([5]). Η πίεση από το ωστικό κύμα είναι σε μορφή step function με αιχμή υπερπίεσης στην αρχή της έκρηξης, η οποία μηδενίζεται μέσα σε μικρό χρονικό διάστημα (τυπικά, της τάξης των milliseconds) και στη συνέχεια αντιστρέφεται σε υποπίεση σημαντικά μικρότερης έντασης μέχρι τη σταθεροποίησή της στη συνήθη ατμοσφαιρική πίεση (βλ. ακόλουθη εικόνα 3). Με βάση την εκτιμηθείσα μάζα εκρηκτικών (χρησιμοποιείται μια μέση τιμή 400 τόνων TNT) και τις αποστάσεις των κτηρίων της Μονάδας από τον κρατήρα προέκυψαν οι υπερπίεσεις αιχμής που απεικονίζονται στην Εικ. 4.



Εικ. 3 Μορφή αναπτυσσόμενης πίεσης λόγω έκρηξης (από [6]).



Εικ. 4 Ισοϋψείς υπερπίεσης λόγω έκρηξης.

Υπάρχουν επίσης εμπειρικοί πίνακες στη βιβλιογραφία που συσχετίζουν τιμές υπερπίεσεων με παρατηρηθείσες ζημιές. Για παράδειγμα, σύμφωνα με τους Crowl & Louvar ([5]), το όριο θραύσης υαλοπινάκων είναι 1-7 kPa, εκείνο της αστοχίας μεταλλικής πλαγιοκάλυψης 10 kPa, της μερικής καταστροφής τοιχοποιίας 17 kPa, ενώ οι τιμές 35-50 kPa αντιστοιχούν σε σχεδόν ολική καταστροφή κτηρίων. Καταδεικνύεται συνεπώς ότι

μεγάλο μέρος των εγκαταστάσεων της Μονάδας Βασιλικού εκτέθηκε σε υπερπίεσεις που υπερβαίνουν το όριο ολικής καταστροφής κτηρίων.

Το τελευταίο βήμα για την εκτίμηση του φορτίου επί των κτηρίων αντιστοιχεί στην εκτίμηση της διάρκειας της υπερπίεσης. Χρησιμοποιώντας και πάλι σχέσεις από την προαναφερθείσα βιβλιογραφία, και θεωρώντας μετάδοση του ωστικού κύματος με ταχύτητα περίπου ίση με αυτή του ήχου, εκτιμήθηκε ότι η διάρκεια της υπερπίεσης στην πλησιέστερη προς την έκρηξη επιφάνεια κτηρίων ήταν της τάξης των 185 ms, ενώ η διάρκεια της υπερπίεσης στην πιο απομακρυσμένη επιφάνεια θα ήταν της τάξης των 310 ms. Για τους παρόντες υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε μια μέση διάρκεια υπερπίεσης 200 ms.

4. ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΦΟΡΕΩΝ

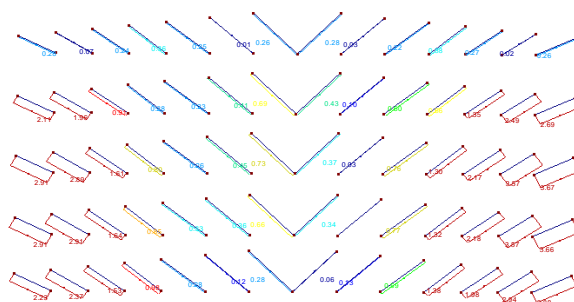
Οι βασικοί φορείς των Μονάδων 4 & 5 είναι μεταλλικά κτήρια ανοίγματος περίπου 58 μέτρων και καθαρού ύψους 18 μέτρων και είχαν σχεδιασθεί σύμφωνα με αρχές σεισμικής πλαστιμότητας. Αυτό σημαίνει ότι για φορτίο που υπερβαίνει το φορτίο σχεδιασμού, προτεραιότητα αστοχίας δίδεται στην οροφή μέσω σχηματισμού πλαστικών αρθρώσεων στα ζευκτά. Με τον τρόπο αυτό, απορροφάται η επιπρόσθετη ενέργεια χωρίς να οδηγείται άμεσα ο φορέας σε προοδευτική κατάρρευση. Τα διαγώνια στοιχεία στα άκρα των ζευκτών διαθέτουν τον υψηλότερο συντελεστή εκμετάλλευσης, ώστε να διαρρεύσουν πρώτα.

Είναι προφανές ότι, εάν η υπερπίεση που αναπτύχθηκε είχε τιμές της τάξης των 30-60 kPa, τότε αυτή είχε υπερβεί το όριο του φορτίου σχεδιασμού κατά τουλάχιστον είκοσι φορές. Για να διερευνηθεί όμως η πραγματική απόκριση των φορέων, λαμβάνεται υπόψη και η δυναμική φύση του φορτίου της έκρηξης. Η επίπτωση του φορτίου πίεσης (βλ. Εικ. 3) στην απόκριση των φορέων εξαρτάται από τη δυσκαμψία τους. Συνήθως, η φάση της υπερπίεσης οδηγεί σε μέγιστη απόκριση τους σχετικά δύσκαμπτους φορείς, ενώ η φάση της υποπίεσης μεγιστοποιεί την απόκριση σε πιο εύκαμπτους φορείς. Η ιδιοπερίοδος του ζευκτού της στέγης είναι περίπου 0.20 sec, που αντιστοιχεί σε $t_0/T = 200\text{ms}/0.20 \text{ sec} \approx 1.0$. Εκτιμάται συνεπώς ότι η καθοριστική απόκριση θα λάβει χώρα κατά την πρώτη φάση της υπερπίεσης ([7]). Η αντιστοιχούσα δυναμική μεγέθυνση υπολογίζεται αντίστοιχα σε περίπου 1.60, ενώ η μέγιστη παραμόρφωση των ζευκτών υπολογίστηκε σε περίπου 750 mm για υπερπίεση 30 kPa.

Η μικρή διάρκεια της φόρτισης οδηγεί σε ρυθμούς παραμόρφωσης σημαντικά υψηλότερους από το τυπικό εύρος μέτρησης των μηχανικών ιδιοτήτων. Για παράδειγμα, "στατικές" φορτίσεις αντιστοιχούν σε ρυθμούς παραμόρφωσης από 10^{-6} έως 10^{-5} , σεισμικές φορτίσεις αντιστοιχούν σε ρυθμούς από 10^{-3} έως 10^{-1} και φορτίσεις εκρήξεων σε ρυθμούς παραμόρφωσης από 10^2 έως 10^4 ([6]). Σε τόσο υψηλούς ρυθμούς παραμόρφωσης, το όριο διαρροής μπορεί να είναι έως και διπλάσιο του "στατικού" και η εφελκυστική αντοχή μπορεί να είναι έως και 50% υψηλότερη της "στατικής" ([6]).

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω σε έναν επανυπολογισμό των ζευκτών οροφής, προκύπτει ότι μια δυναμική υπερπίεση 30 kPa οδηγεί σε αστοχία τα διαγώνια και κατακόρυφα στοιχεία των τριών πρώτων φανωμάτων των ζευκτών (βλ. Εικ. 5).

STEEL C47
Sigma-eqv



Max Sigma-eqv: 3.67, Min Sigma-eqv: 0.00

Εικ. 5 Προσομοίωση έκρηξης - Συντελεστές εκμετάλλευσης διαγωνίων ζευκτών.

Τα αποτελέσματα αυτά συμβαδίζουν με τις παρατηρηθείσες αστοχίες, όπως φαίνεται και στην ακόλουθη εικόνα.



Εικ. 6 Παρατηρηθείσα αστοχία - Αριστερά: Γενική άποψη - Δεξιά: Αστοχία ζευκτού.

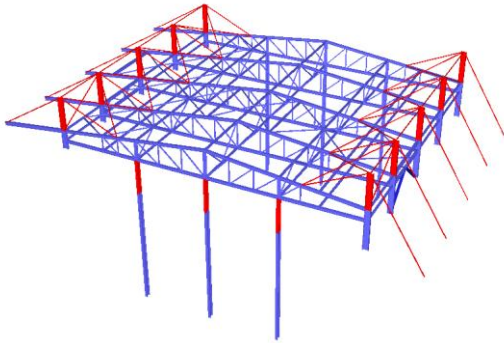
Καθίσταται προφανές από τα παραπάνω ότι η εφαρμογή πλαστικού σχεδιασμού επέτρεψε στο φορέα να υποστεί φόρτιση εικοσαπλάσια του σχεδιασμού χωρίς κατάρρευση. Με τον τρόπο αυτό, η ζημιά περιορίστηκε στους φορείς και δεν υπήρξαν επιπτώσεις στο μηχανολογικό εξοπλισμό, γεγονός που επέτρεψε την ταχεία αποκατάσταση της λειτουργίας της μονάδας.

5. ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Παρά την ικανοποιητική συμπεριφορά των φορέων σε ένα ιδιαίτερα ακραίο γεγονός, έχει εξαντληθεί η αντοχή τους και απαιτείται η αντικατάστασή τους. Λόγω της σημαντικής αξίας του εξοπλισμού στο εσωτερικό των κτηρίων, οι εργασίες αποκατάστασης πρέπει να διασφαλίσουν ότι δεν θα υπάρξει πιθανότητα πτώσης στοιχείων.

Όλες οι εργασίες θα διεξαχθούν από το εξωτερικό του κτηρίου, ώστε να μην απαιτηθεί παρουσία προσωπικού εντός του κτηρίου. Η λύση που εφαρμόστηκε περιελάμβανε τα ακόλουθα:

- Επέκταση των υποστυλωμάτων καθ' ύψος.
- Πρόσδεση αναρτήρων στη νέα κορυφή των υποστυλωμάτων.
- Σύνδεση των αναρτήρων με τα ζευκτά σε θέσεις πέραν των πλαστικών αρθρώσεων.
- Σταδιακή αντικατάσταση των ζευκτών.



Εικ. 7 Αποκατάσταση - Αριστερά: Προσομοίωμα σχεδιαμού - Δεξιά: Υλοποίηση.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η έκρηξη της 11ης Ιουλίου 2011 προκάλεσε εκτεταμένη καταστροφή στη Μονάδα παραγωγής ρεύματος Βασιλικού στην Κύπρο. Η επίπτωση της έκρηξης ποσοτικοποιήθηκε ως ισοδύναμη δυναμική φόρτιση με την οποία προσομοιώθηκε η απόκριση φορέων. Καταδεικνύεται ότι ο πλάστιμος σχεδιασμός επέτρεψε στο βασικό φορέα να υποστεί εικοσαπλάσια φόρτιση σε σχέση με τον αρχικό σχεδιασμό χωρίς κατάρρευση. Τέλος, παρουσιάζεται η υλοποιηθείσα αποκατάσταση.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Politis Newspaper of Cyprus, online edition, <http://www.politis-news.com/cgi-bin/hweb?-A=210060&-V=articles>, accessed 17.07.2011.
- [2] Politis Newspaper of Cyprus, online edition, <http://www.politis-news.com/cgi-bin/hweb?-A=210215&-V=articles>, accessed 21.07.2011.
- [3] BANASH, M.Y.H., "Explosion and Buildings", in "Prototype building structures: analysis and design", Thomas Telford, 1999.
- [4] LUCCIONI, B.M., AMBROSINI, D., KIM YUEN, S.C., NURICK, G.N., "Evaluating the Effect of Large and Spread Explosives Loads", in "Mecanica Computational Vol. XXVIII", Bauza, C.G., Lotito, P., Parente, L. and Venere, M. (Eds.), Asociacion Argentina de Mecanica Computacional, 2009.
- [5] CROWL, D.A., LOUVAR, J.F., "Chemical Process Safety. Fundamentals with Applications", Prentice Hall, 2002.
- [6] NGO, T., MENDIS, P., GUPTA, A., RAMSAY, J., "Blast Loading and Blast Effects on Structures – An Overview", EJSE, 2007.
- [7] CLOUGH, R.W. , PENZIEN, J., "Dynamics of Structures", McGraw-Hill, 1975.

RESPONSE TO BLAST LOADING OF POWER PLANT STEEL STRUCTURES

Michael Angelides

Structural Engineer

AMTE Consulting Engineers

Athens, Greece

e-mail: amte@otenet.gr

SUMMARY

In the summer of 2011 a large explosion caused extensive damage to a power plant in Cyprus. The blast loading is quantified and the corresponding structural response is estimated. The significant merits of ductile design are demonstrated and the rehabilitation measures are presented.