

ΜΕΤΑΛΛΙΚΗ ΚΑΜΙΝΑΔΑ ΥΨΟΥΣ 80 ΜΕΤΡΩΝ

Μιχάλης Αγγελίδης
Πολιτικός Μηχανικός
AMTE A.E. Τεχνικών Μελετών
Αθήνα
e-mail: amte@otenet.gr

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Παρουσιάζεται η μελέτη μεταλλικής καμινάδας ύψους 80 μέτρων και διαμέτρου 7,2 μέτρων για τη μονάδα παραγωγής ρεύματος Μεγαλόπολης 5. Το σημαντικό ύψος της καμινάδας σε συνδυασμό με το μεγάλο άνοιγμα εισόδου των καυσαερίων και την καθοριστική σεισμική φόρτιση απαίτησαν τη χρήση λεπτομερούς προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για την ανάλυση και τη διαστασιολόγηση, καθώς και σειρά διερευνητικών υπολογισμών για τον καθορισμό της βέλτιστης ενίσχυσης της περιοχής του ανοίγματος.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η καμινάδα σχεδιάστηκε για τις ανάγκες της νέας μονάδας παραγωγής ρεύματος της ΔΕΗ στη Μεγαλόπολη (ΑΗΣ Μεγαλόπολης 5). Το έργο κατασκευής της μονάδας έχει αναλάβει η κοινοπραξία ΜΕΤΚΑ-ΕΤΑΔΕ και εκτελείται από την ΤΕΡΝΑ. Η ΤΕΡΝΑ ανέθεσε στη ΝΕΜ Ολλανδίας την προμήθεια της καμινάδας και του λέβητα, και η ΝΕΜ ανέθεσε τη στατική και αντισεισμική μελέτη των φορέων αυτών στην ΑΜΤΕ. Ο έλεγχος της μελέτης διεξήχθη από τη ΔΕΗ (ΔΜΚΘ: Διεύθυνση Μελετών και Κατασκευών Θερμοηλεκτρικών έργων). Η μελέτη ολοκληρώθηκε το 2010.

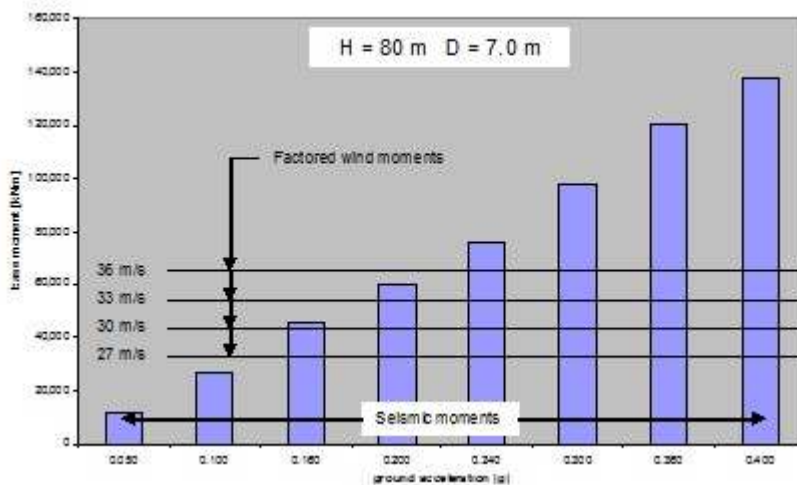
Η καμινάδα έχει ύψος 80 μέτρων, διάμετρο 7,2 μέτρων και παροχετεύει στην ατμόσφαιρα θερμά αέρια από το λέβητα της μονάδας. Η θερμοκρασία σχεδιασμού των αερίων στο εσωτερικό της καμινάδας είναι 153 βαθμοί Κελσίου και η εσωτερική πίεση των αερίων είναι 2 mbar. Η προδιαγραφή του έργου απαιτούσε πρόβλεψη απώλειας πάχους λόγω διάβρωσης έως 6 χιλ. Ο σχεδιασμός έγινε με βάση το διεθνή κανονισμό μεταλλικών καμινάδων (CICIND Model Code for Steel Chimneys, «[1]»), καθώς και τους ισχύοντες στην Ελλάδα κανονισμούς, ήτοι EN 1993 και ΕΑΚ. Τα φορτία ανέμου υπολογίστηκαν σύμφωνα με τον EN 1991.

2. ΦΟΡΤΙΑ ΑΝΕΜΟΥ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΟΥ

Η βασική ταχύτητα ανέμου κατά EN 1991 είναι 27 m/sec και η κατηγορία εδάφους στην περιοχή του έργου καθορίστηκε ως III. Η κατανομή των ανεμοπιέσεων καθ' ύψος της καμινάδας και γύρω από την περιφέρεια υπολογίστηκε σύμφωνα με τον EN 1991. Διερευνήθηκε επίσης η περίπτωση διέγερσης της καμινάδας σε ταλαντώσεις κάθετες προς τη φορά του ανέμου, λόγω αναπτυσσόμενης στροβιλώδους ροής. Η σχετικά υψηλή δυσκαμψία της καμινάδας οδηγεί σε χαμηλές τιμές για την πρώτη και δεύτερη ιδιοσυχνότητα, έτσι ώστε η κρίσιμη ταχύτητα να βρίσκεται εκτός των ορίων πιθανής διέγερσης.

Η σεισμική φόρτιση αντιστοιχεί σε επιτάχυνση εδάφους 0,24g, κατηγορία εδάφους Γ, συντελεστή σπουδαιότητας 1,3 και συντελεστή συμπεριφοράς $q=1,5$. Ο συντελεστής διόρθωσης της απόσβεσης είναι 1,32 λόγω των συγκολλητών ενώσεων.

Συνήθως η ανεμοπίεση αποτελεί την καθοριστική φόρτιση για μεταλλικές καμινάδες, λόγω της μικρής σχετικά με το ύψος μάζας. Όσο όμως αυξάνεται το επίπεδο της σεισμικής δράσης, τόσο μειώνεται και η διαφορά μεταξύ αποκρίσεων από σεισμό και άνεμο. Για καμινάδες με μεγάλη σχετικά διάμετρο, καταδεικνύεται ότι ήδη από το επίπεδο της επιτάχυνσης εδάφους των 0,16g η σεισμική δράση καθίσταται καθοριστική για τη διαστασιολόγηση («[2]», βλ. και Σχ. 1). Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η σχετικά χαμηλή (σε σχέση με το ύψος της καμινάδας) ιδιοπερίοδος οδήγησε σε υψηλά επίπεδα σεισμικών αποκρίσεων.



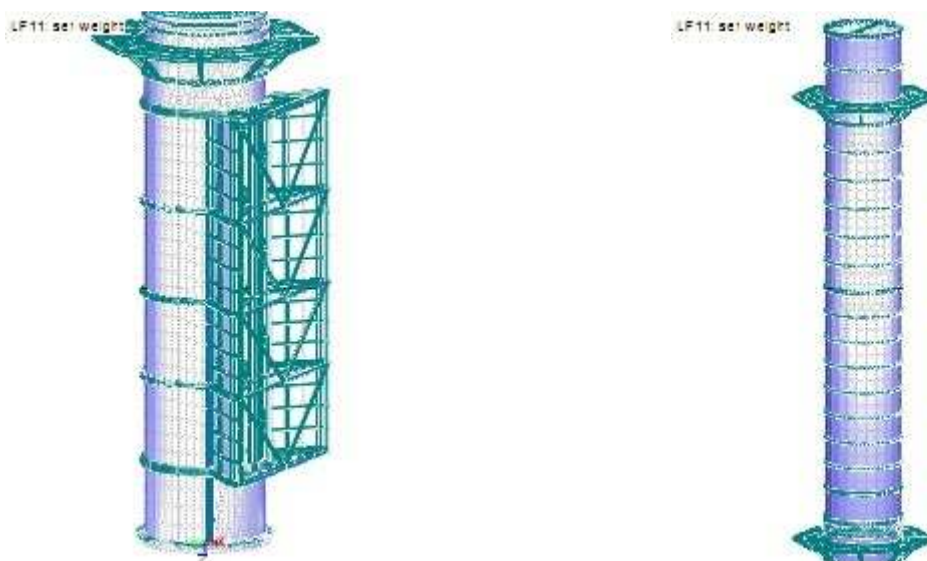
Σχ. 1: Σύγκριση μεταξύ ροπών βάσης από άνεμο και σεισμό για διάφορα επίπεδα φορτίσεων (από «[2]»)

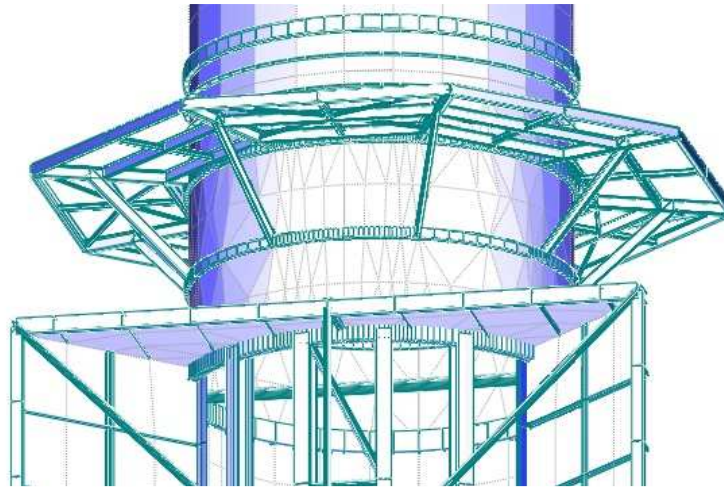
3. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Το σημαντικό ύψος της καμινάδας, η μεγάλη διάμετρος και οι διαστάσεις του ανοίγματος εισόδου των καυσαερίων ($6,2 \times 21,6$ μέτρα) απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή στην προσομοίωση του φορέα. Το όριο λυγηρότητας που συστήνεται στον CICIND για χρήση της θεωρίας δοκών είναι ύψος/ακτίνα > 50 (στην προκειμένη περίπτωση ο λόγος αυτός είναι 22,2). Αντίστοιχα, ο EN 1993-3-2 συστήνει ως όριο του λόγου αυτού το

$(0,14 \times \text{ακτίνα}/\text{πάχος} + 10)$ («[3]»), το οποίο στην προκειμένη περίπτωση υπερβαίνει το 40 για τα χρησιμοποιούμενα πάχη. Είναι συνεπώς σαφές ότι δεν μπορεί απλά να χρησιμοποιηθεί η θεωρία δοκών για την ανάλυση και διαστασιολόγηση του φορέα και πρέπει να ληφθεί υπόψη η θεωρία κελυφών, είτε αναλυτικά είτε με χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Χρησιμοποιήθηκαν δυο προσομοιώματα: ένα αναλυτικό προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων για την ανάλυση και διαστασιολόγηση και ένα ραβδόμορφο για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων. Το πρώτο προσομοίωμα περιλαμβάνει συνολικά 3053 κόμβους, 3449 πεπερασμένα στοιχεία για προσομοίωση του κελύφους και 1518 γραμμικά στοιχεία για προσομοίωση των νευρώσεων και πλατφορμών. Εικόνες του προσομοιώματος αυτού παρουσιάζονται στο Σχ. 2.

Στην αρχή διεξήχθησαν διερευνητικοί υπολογισμοί για τον καθορισμό του είδους και της έκτασης των απαιτούμενων ενισχύσεων στην περιοχή του μεγάλου ανοίγματος εισόδου των καυσαερίων. Όπως φαίνεται και στο ακόλουθο Σχ. 2, η σύνδεση με το λέβητα βρίσκεται εκτός της περιφέρειας της καμινάδας, γεγονός το οποίο απαιτεί προέκταση σε πρόβολο του κελύφους σε απόσταση περίπου 1,60 μέτρα από την περιφέρεια στο κέντρο και περίπου 4,00 μέτρα στα άκρα. Οι στόχοι των ενισχύσεων είναι οι ακόλουθοι: περιορισμός των τάσεων αιχμής του κελύφους σε ανεκτά επίπεδα, περιορισμός των παραμορφώσεων στην περιοχή του ανοίγματος σε επίπεδα ανεκτά από το διαστολικό, ομογενοποίηση της απόκρισης της καμινάδας προς όλες τις διευθύνσεις έτσι ώστε να μην προκύπτουν σημαντικά ασθενέστεροι προσανατολισμοί διατομών που θα οδηγούσαν σε διέγερση από στροβιλώδη ροή για συγκεκριμένες γωνίες ανέμου και ομογενοποίηση κατά το δυνατό της κατανομής των δυνάμεων στη βάση του κελύφους.





Σχ. 2: Εικόνες του προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων

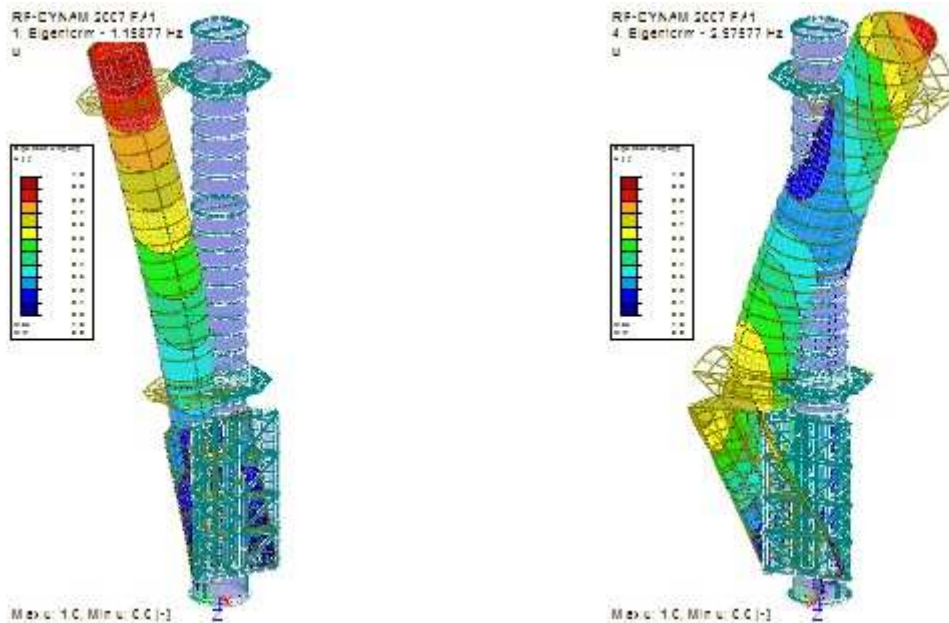
Λόγω της απαίτησης για πρόβλεψη απώλειας πάχους έως 6 χιλιοστά από οξείδωση, κάθε προσομοίωμα αναλύθηκε δυο φορές αντιστοιχώντας στις φάσεις με ή χωρίς οξείδωση. Με εξαίρεση τη σεισμική φόρτιση η απόκριση στην οποία υπολογίσθηκε με φασματική ανάλυση, οι λοιπές φορτίσεις ασκήθηκαν μέσω επιφανειακών ή σημειακών φορτίων επί του προσομοιώματος των πεπερασμένων στοιχείων. Η επίπτωση της θερμοκρασίας ελήφθη υπόψη μέσω αντίστοιχης μείωσης των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του CICIND:

$$f_{y,T} = f_y \left\{ 1 + \frac{T}{767 \times \log_e(T/1750)} \right\} = 216 \text{MPa} \quad (1)$$

Για την προσομοίωση της φάσης ανέγερσης, χρησιμοποιήθηκαν υποσύνολα του γενικού προσομοιώματος, τα οποία αντιστοιχούν στα επί μέρους τμήματα ανύψωσης κατά την ανέγερση, με σκοπό τη διαστασιολόγηση του συστήματος στήριξης κατά την ανύψωση και των τυχόν επιπτώσεων στο κέλυφος.

3. ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ

Λόγω της μορφής του φορέα (εύκαμπτο κέλυφος μεγάλης διαμέτρου), απαιτήθηκε ιδιαίτερα υψηλός αριθμός ιδιομορφών για να επιτευχθεί ικανή συμμετοχή μάζας (200 ιδιομορφές για 90% συμμετοχή μάζας), καθότι υπάρχουν πολλές τοπικές ιδιομορφές διέγερσης των διατομών μεταξύ των νεύρων της καμινάδας. Η πρώτη ιδιοπερίοδος βρίσκεται στα 0.91 sec και 0.90 sec για τις δυο κύριες διευθύνσεις αντίστοιχα (0.86 και 0.84 για την διαβρωμένη κατάσταση) και η δεύτερη ιδιοπερίοδος είναι 0.34 sec και 0.22 sec αντίστοιχα (0.34 και 0.24 για τη διαβρωμένη κατάσταση). Στο Σχ. 3 παρουσιάζονται γραφικές απεικονίσεις των δυο πρώτων ιδιομορφών που αντιστοιχούν στη διαβρωμένη κατάσταση.

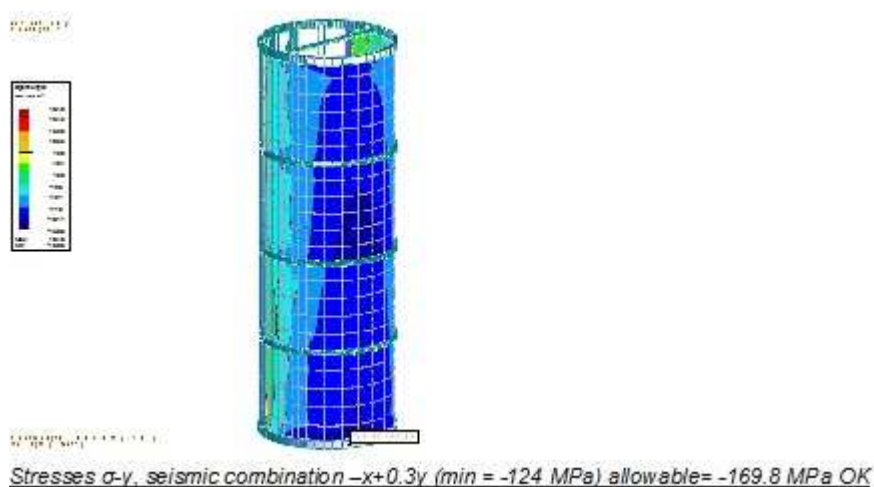


Σχ. 3: Εικόνες των 2 πρώτων ιδιομορφών

Η μέγιστη μετακίνηση στην κορυφή υπολογίστηκε ως 256 χιλ, ήτοι 1/312. Στους καθοριστικούς για τη διαστασιολόγηση σεισμικούς συνδυασμούς συμπεριλήφθηκε και συμμετοχή του σεισμού στη δευτερεύουσα διεύθυνση κατά 30%.

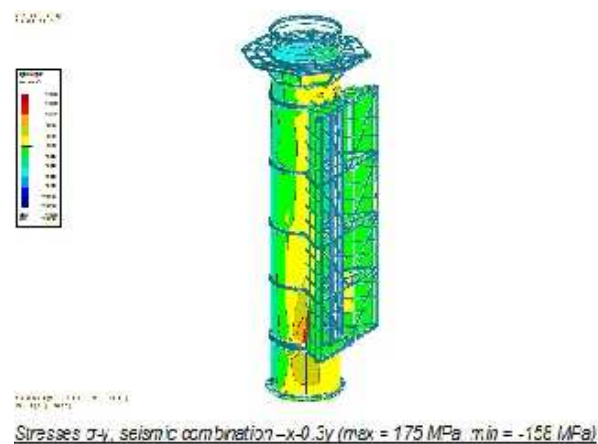
4. ΕΛΕΓΧΟΙ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ

Οι έλεγχοι ευστάθειας διεξήχθησαν σύμφωνα με τον κανονισμό του CICIND (=International Committee for Industrial Chimneys) για μεταλλικές καμινάδες. Οι επιτρεπόμενες θλιπτικές τάσεις υπολογίζονται πρώτα σύμφωνα με τις απαιτήσεις του CICIND με βάση τα γεωμετρικά στοιχεία του κελύφους στη συγκεκριμένη θέση και στη συνέχεια συγκρίνονται με τις αναπτυσσόμενες στη θέση αυτή.

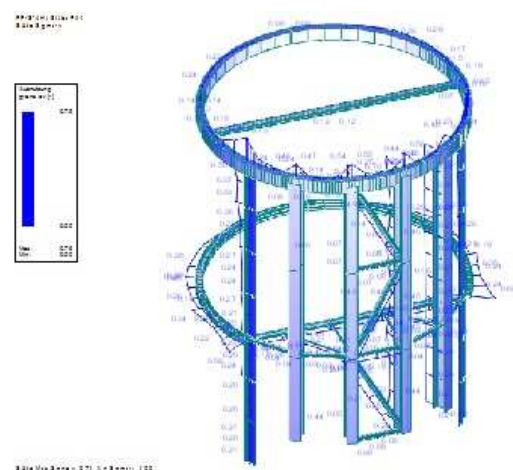


Σχ. 4: Παράδειγμα ελέγχου ευστάθειας

Οι έλεγχοι των εφελκυστικών τάσεων του κελύφους και οι έλεγχοι των νευρώσεων και λοιπών φορέων διεξήχθησαν με βάση τις απαιτήσεις του CICIND και του EN 1993. Στα ακόλουθα σχήματα παρατίθενται απεικονίσεις των ελέγχων αυτών.

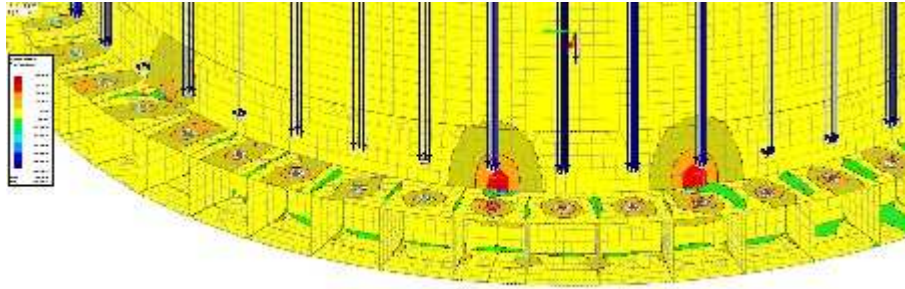


Σχ. 5: Παράδειγμα ελέγχου τάσεων κελύφους



Σχ. 6: Συντελεστές εκμετάλλευσης νευρώσεων στην περιοχή του ανοίγματος

Για τη διαστασιολόγηση της βάσης της καμινάδας και τον καθορισμό του συστήματος αγκύρωσης, διεξήχθησαν κατ'αρχήν έλεγχοι με βάση τις συστάσεις του Παραρτήματος 1 του CICIND. Από τους αρχικούς ελέγχους προέκυψε η ανάγκη χρήσης δακτυλίου θλίψης σημαντικών διαστάσεων λόγω των μεγάλων σεισμικών φορτίων, γεγονός το οποίο οδήγησε σε περιοχές εκτός των πινάκων του κανονισμού. Για τη διαστασιολόγηση συνεπώς της περιοχής της βάσης χρησιμοποιήθηκε λεπτομερές προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων, επί του οποίου ασκήθηκαν τα φορτία των αγκυριών όπως αυτά υπολογίστηκαν κατά την ανάλυση. Επισημαίνεται ότι η ανάγκη χρήσης λεπτομερών προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων για τις περιοχές αυτές συνιστάται και από τον κανονισμό λόγω του γεγονότος ότι δεν ισχύει η θεωρία δοκών (Euler-Bernoulli). Και αυτό γιατί οι διατομές δεν παραμένουν επίπεδες και, συνεπώς, δεν μπορεί να θεωρηθεί γραμμική κατανομή των τάσεων και των δυνάμεων των αγκυριών γύρω από την περιφέρεια για δεδομένη ροπή κάμψης.



Σχ. 7: Αναπτυσσόμενες τάσεις στην περιοχή της βάσης

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η χρήση λεπτομερών προσομοιωμάτων υπολογισμού είναι απαραίτητη για την ανάλυση και διαστασιολόγηση κελυφών μεγάλης διαμέτρου και σημαντικών γεωμετρικών ανομοιομορφιών. Στην προκειμένη περίπτωση, οι μεγάλες διαστάσεις του ανοίγματος εισροής αερίων, η διάμετρος των 7,2 μέτρων, το ύψος των 80 μέτρων και η καθοριστική σεισμική φόρτιση απαίτησαν λεπτομερείς υπολογισμούς για τη διασφάλιση της αξιοπιστίας του σχεδιασμού.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] CICIND. “Model Code for Steel Chimneys”, 2010.
- [2] ANGELIDES M. “Seismic Design of Steel Chimneys”, *Technical Manual for Industrial Chimneys*, CICIND, 2011.
- [3] EN 1993-3-2. “Design of Steel Structures. Towers, masts and chimneys. Chimneys”, 2006.

STEEL CHIMNEY 80 M HIGH

Michael Angelides

Structural Engineer

AMTE Consulting Engineers

Athens, Greece

e-mail: amte@otenet.gr

SUMMARY

The present report describes the design of a steel chimney of 80 meters height and 7,2 m diameter for the Megalopolis 5 power plant. The significant height in combination with the large flue gas duct opening and the determining seismic loading necessitated the use of a detailed finite element model for the analysis and detailing of the structure, as well as a series of investigative calculations in order to define the optimum reinforcement for the opening region.