

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΜΙΝΑΔΩΝ ΜΕΓΑΛΗΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ

Μιχάλης Αγγελίδης

Πολιτικός Μηχανικός

AMTE A.E.

Αθήνα, Ελλάδα

e-mail: amte@otenet.gr

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι διάμετροι των μεταλλικών καμινάδων δεν υπερβαίνουν συνήθως τα 4.0 μ. Εξαίρεση αποτελούν οι καμινάδες που εξυπηρετούν λέβητες μονάδων παραγωγής ρεύματος συνδυασμένου κύκλου. Στις περιπτώσεις αυτές, οι διάμετροι των καμινάδων είναι της τάξης των 7.0 - 8.0 μ. Το μεγάλο μέγεθος της διαμέτρου, σε συνδυασμό με πρόσθετες ιδιαιτερότητες των καμινάδων αυτών, όπως τα πολύ μεγάλα ανοίγματα εισόδου καυσαερίων, επιβάλλουν διαφορετική αντιμετώπιση κατά το σχεδιασμό και την κατασκευή. Εξετάζονται οι ιδιαιτερότητες αυτές, καθώς και οι τρόποι αντιμετώπισής τους, με αναφορά στους κύριους διεθνείς κανονισμούς σχεδιασμού μεταλλικών καμινάδων.

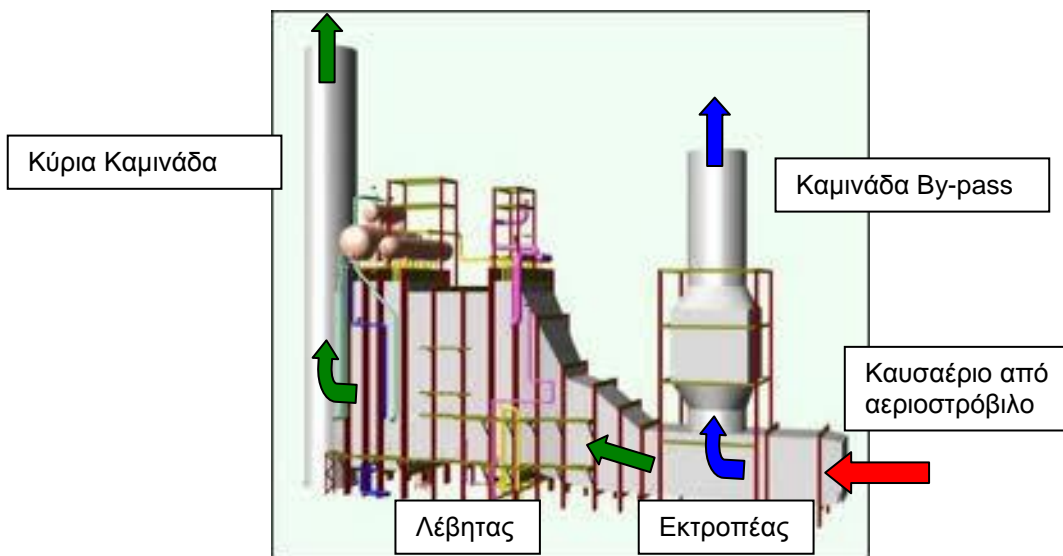
2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι διάμετροι των μεταλλικών καμινάδων δεν υπερέβαιναν συνήθως τα 4.0 μ, και αυτό αποτυπώνεται στη σχετική τεχνική βιβλιογραφία. Η σχετικά πρόσφατη ανάπτυξη και ευρεία διάδοση των σταθμών παραγωγής ρεύματος συνδυασμένου κύκλου έχει οδηγήσει σε καπνοδόχους απαγωγής καυσαερίων με διαμέτρους της τάξης των 7-8 μέτρων. Η παρούσα εργασία εξετάζει τις ιδιαιτερότητες που εισάγονται από τις μεταλλικές καμινάδες μεγάλης διαμέτρου και τις επιπτώσεις τους στο σχεδιασμό και την κατασκευή, με αναφορά στους κύριους κανονισμούς σχεδιασμού μεταλλικών καμινάδων.

3. Ο ΣΤΑΘΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΟΥ ΚΥΚΛΟΥ ΚΑΙ ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΚΑΜΙΝΑΔΕΣ

Όπως υποδηλώνεται και από το όνομά του, ο σταθμός παραγωγής ρεύματος συνδυασμένου κύκλου διαθέτει δυο κύκλους παραγωγής ρεύματος: Τον κύκλο αερίου ή ανοικτό κύκλο, ο οποίος αποτελείται από έναν αεριοστρόβιλο και τον κύκλο ατμού, στον

οποίο τα καυσαέρια του αεριοστροβίλου οδηγούνται σε λέβητα παραγωγής ατμού με στόχο την πρόσθετη παραγωγή ρεύματος και από αμοστροβίλο. Η λειτουργία αυτή παρουσιάζεται γραφικά στην ακόλουθη εικόνα.

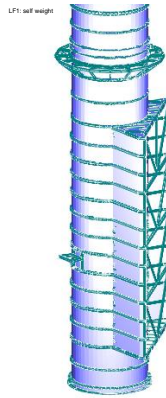


Εικ. 1 Λέβητας και καμινάδες σε Σταθμό Συνδυασμένου Κύκλου

Κατά τη λειτουργία μόνον του ανοικτού κύκλου, ο λέβητας δεν λειτουργεί και απομονώνεται από τον εκτροπέα. Στην περίπτωση αυτή η καμινάδα by-pass χρησιμοποιείται για την απαγωγή των καυσαερίων του αεριοστροβίλου. Κατά τη λειτουργία του συνδυασμένου κύκλου, ο εκτροπέας απομονώνει την καμινάδα by-pass και οδηγεί τα καυσαέρια στο λέβητα και από εκεί στην κύρια καμινάδα.

Η κύρια και η by-pass καμινάδες σε μονάδες συνδυασμένου κύκλου έχουν συνήθως διαμέτρους της τάξης των 7-8 μέτρων. Η αναγκαία διακοπή της καμινάδας by-pass από τον εκτροπέα, συνεπάγεται την ανάγκη στήριξης της καμινάδας αυτής σε μεταλλικό ικριώμα και τον διαχωρισμό της από τον εκτροπέα με τη βοήθεια διαστολικού. Η δυσκαμψία του μεταλλικού ικριώματος αποτελεί βασική παράμετρο του συστήματος και πρέπει να ληφθεί υπόψη με ιδιαίτερη προσοχή στο σχεδιασμό, κυρίως λόγω του γεγονότος ότι η παρουσία του εκτροπέα δεν επιτρέπει συνήθως τη διάταξη αντιανεμίων στη διεύθυνση κάθετα προς τη ροή των καυσαερίων.

Η σύνδεση της κύριας καμινάδας με το λέβητα απαιτεί συνήθως ένα άνοιγμα μεγάλων διαστάσεων. Το άνοιγμα αυτό μπορεί να έχει εύρος έως και 150° και ύψος που να υπερβαίνει τα 20 μέτρα. Εφόσον ένα τέτοιο άνοιγμα είναι μεγαλύτερο από τα δυο τρίτα της διαμέτρου της καμινάδας, συχνά συμφέρει να αντικαθίσταται το ένα άνοιγμα από πλήθος ισοδύναμων κυκλικών ανοιγμάτων, όπως εξάλλου προτείνεται και από τα σχόλια του κανονισμού CICIND. Το διαστολικό μεταξύ καμινάδας και λέβητα είναι συνήθως μεγαλύτερο από το άνοιγμα στην καμινάδα, γεγονός που οδηγεί στην απαίτηση για ένα προεξέχον τμήμα αγωγού σημαντικών διαστάσεων, το οποίο πρέπει να είναι συνδεδεμένο με την καμινάδα, όπως φαίνεται και στην ακόλουθη εικόνα.



Εικ. 2 Κάτω τμήμα καμινάδας με προεξέχον τμήμα αγωγού εισόδου

4. ΙΔΙΑΙΤΕΡΟΤΗΤΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Οι κανονισμοί που χρησιμοποιούνται διεθνώς για το σχεδιασμό μεταλλικών καμινάδων είναι οι "CICIND Model Code for Steel Chimneys" ([1]), ο Αμερικανικός κανονισμός μεταλλικών καμινάδων (ASME STS-1, [2]) και οι σχετικοί Ερωκώδικες EN 1993-3-2 [3] (Σχεδιασμός Μεταλλικών Καμινάδων) και EN 1993-6 [4] (Αντοχή και Ευστάθεια Μεταλλικών Κελυφών). Εκτός από τα συνήθη θέματα που σχετίζονται με το σχεδιασμό μεταλλικών καμινάδων, τα ακόλουθα αποτελούν ιδιαιτερότητες των καμινάδων μεγάλης διαμέτρου των σταθμών συνδυασμένου κύκλου.

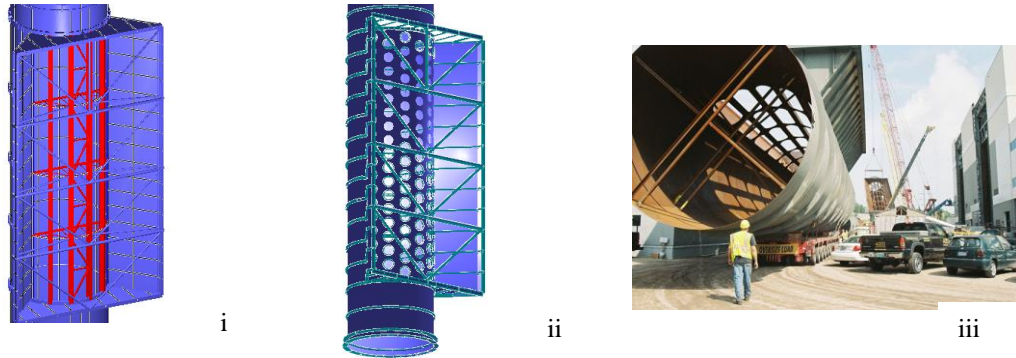
Απαιτείται συχνά να διατάσσονται ρυθμιστές ροής (dampers) μέσα στην κύρια καμινάδα με σκοπό τον έλεγχο της απώλειας θερμοκρασίας από το λέβητα κατά τη διάρκεια προσωρινής διακοπής. Λόγω του μεγέθους της διαμέτρου της καμινάδας, τα εξαρτήματα αυτά έχουν βάρη που κυμαίνονται από 5 έως και 20 τόνους. Παρομοίως, εάν απαιτείται η εγκατάσταση σιγαστήρα μέσα στην καμινάδα, το πρόσθετο αυτό βάρος αναμένεται να κυμαίνεται από 10 έως 25 τόνους. Τα βάρη αυτά έχουν σημαντική επίπτωση στη δυναμική απόκριση της καμινάδας και γενικά απαιτούν ιδιαίτερες διατάξεις για την εισαγωγή τους στο κέλυφος.

Ο ρυθμιστής ροής τοποθετείται συνήθως αμέσως μετά (επάνω από) το άνοιγμα. Όταν ο ρυθμιστής είναι κλειστός, η ανάπτυξη εσωτερικής πίεσης από το λέβητα μπορεί να φθάσει σε τιμές έως και 6 kPa. Η κατανομή των εσωτερικών αυτών πιέσεων αποτελεί σημαντική φόρτιση, η οποία επιδρά επίσης και στη ροπή βάσης.

Στην περίπτωση των συνήθων λυγερών καμινάδων, η σεισμική φόρτιση δεν είναι καθοριστική για περιοχές μικρής έως μεσαίας σεισμικότητας. Επειδή όμως η δυσκαμψία της καμινάδας αυξάνεται με την αύξηση της διαμέτρου, η σεισμική φόρτιση μπορεί να καταστεί καθοριστική, ιδιαίτερα σε περιοχές υψηλής σεισμικότητας [5]. Αντιθέτως, η αυξημένη δυσκαμψία μιάς καμινάδας μεγάλης διαμέτρου μπορεί να την καταστήσει λιγότερο επιρρεπή σε ταλαντώσεις λόγω ανέμου κάθετα στη ροή.

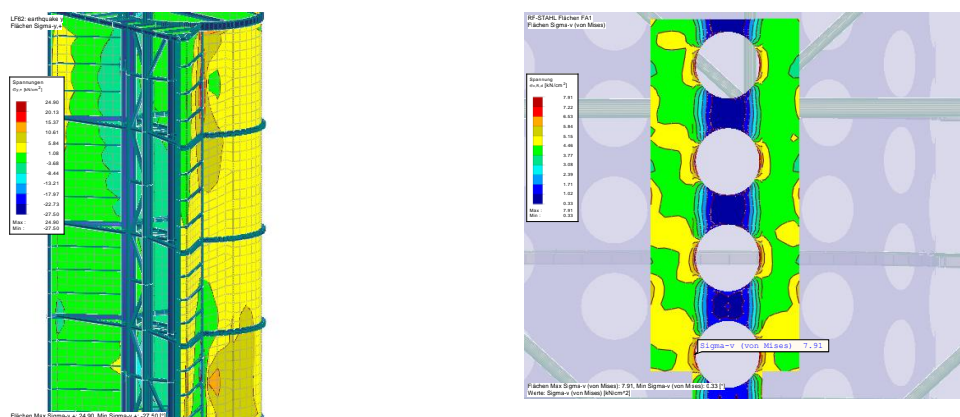
Οι συνήθεις λυγερές καμινάδες υπολογίζονται συχνά με χρήση της θεωρίας δοκών. Ο Αμερικανικός κανονισμός ASME STS-1 έχει τη θεωρία δοκών ως βάση των τύπων υπολογισμού που παραθέτει. Οι κανονισμοί CICIND και EN 1993 αναφέρονται μόνο σε καμινάδες χωρίς νευρώσεις. Η θεωρία κελυφών δεν μπορεί όμως να αγνοηθεί στην περίπτωση των καμινάδων μεγάλης διαμέτρου.

Το μεγάλο άνοιγμα εισόδου των καυσαερίων επιδρά σημαντικά στην απόκριση της καμινάδας. Απαιτούνται ιδιαίτερα μέτρα για την αποκατάσταση της δυσκαμψίας και αντοχής της περιοχής. Η εκτίμηση της αποτελεσματικότητας των εναλλακτικών μεθόδων ενίσχυσης της περιοχής του ανοίγματος απαιτεί τη χρήση της θεωρίας κελυφών.



Εικ. 3 Ενίσχυση ανοίγματος με διακριτά στοιχεία (i) και μέσω πολλαπλών ανοιγμάτων (ii, iii)

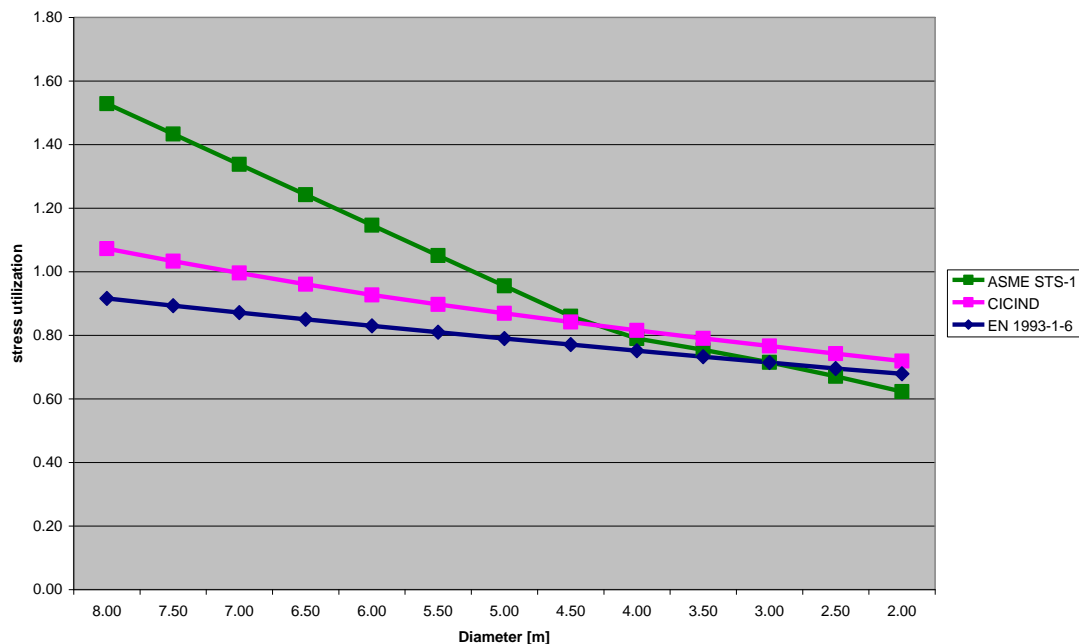
Η ροή των δυνάμεων γύρω από το άνοιγμα επηρεάζεται από τη διάταξη και το είδος των ενισχύσεων και ανοιγμάτων και απαιτείται λεπτομερές προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων για το σχεδιασμό της περιοχής. Στην περίπτωση ενίσχυσης με διακριτά μέλη, οι προκύπτουσες μεγάλες διαστάσεις των συγκεκριμένων δοκών διαταράσσουν το εντατικό πεδίο και απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στην αντιμετώπιση της μεταφοράς δυνάμεων μεταξύ κελύφους και δοκών ενίσχυσης. Επιπλέον, επειδή το άνοιγμα βρίσκεται συνήθως κοντά στη βάση της καμινάδας, διαταράσσεται και η κατανομή των δυνάμεων στα αγκύρια σύνδεσης με τη θεμελίωση. Η διάταξη πολλαπλών κυκλικών (ή οβάλ) ανοιγμάτων σε αντικατάσταση του μεγάλου ανοίγματος οδηγεί σε λιγότερη σοβαρή διατάραξη της ροής δυνάμεων. Παρόλα αυτά, πρέπει να αντιμετωπισθούν προσεκτικά τα θέματα αντοχής και ευστάθειας της περιοχής και στην περίπτωση αυτή, συνήθως οδηγώντας σε συγκεκριμένες απαιτήσεις προσθέτων ενισχύσεων.



Εικ. 4 Ροή δυνάμεων στην περιοχή ανοίγματος με διακριτά μέλη (αριστερά) και με πολλαπλά ανοίγματα (δεξιά)

Ο σχεδιασμός της καμινάδας ακολουθεί τη διαδικασία που προδιαγράφεται στους προαναφερθέντες κυρίους διεθνείς κανονισμούς. Εχει παρόλα αυτά παρατηρηθεί μια σημαντική διαφορά στην αντιμετώπιση της ευστάθειας υπό διαμήκεις θλιπτικές τάσεις μεταξύ του Αμερικανικού κανονισμού ASME STS-1 και των CICIND και EN 1993-6 για την περίπτωση καμινάδων μεγάλης διαμέτρου. Και οι τρεις κανονισμοί θεωρούν μια τιμή

εκκίνησης για την τάση λυγισμού, η οποία προκύπτει από τη γραμμική θεωρία, και στη συνέχεια εφαρμόζουν μειωτικούς συντελεστές για την αντιμετώπιση ατελειών και θεμάτων γεωμετρικής μη γραμμικότητας και μη γραμμικότητας υλικού. Η αντιμετώπιση των συντελεστών αυτών είναι συγκρίσιμη μεταξύ των τριών αυτών κανονισμών για διαμέτρους έως περίπου 4 μέτρα. Για μεγαλύτερες διαμέτρους, ο κανονισμός ASME STS-1 υιοθετεί σημαντικά πιο συντηρητική προσέγγιση από τους CICIND και EN 1993-6. Η διαφορά αυτή αποτυπώνεται στην ακόλουθη εικόνα, η οποία παρουσιάζει συντελεστές εκμετάλλευσης τάσεων υπολογισμένους σύμφωνα με κάθε ένα από τους τρεις αυτούς κανονισμούς για συγκεκριμένο συνδυασμό αξονικών και καμπτικών θλιπτικών τάσεων.



Εικ. 5 Σύγκριση αποτελεσμάτων CICIND, EN 1993-6 και ASME STS-1 για διαμήκη θλίψη.

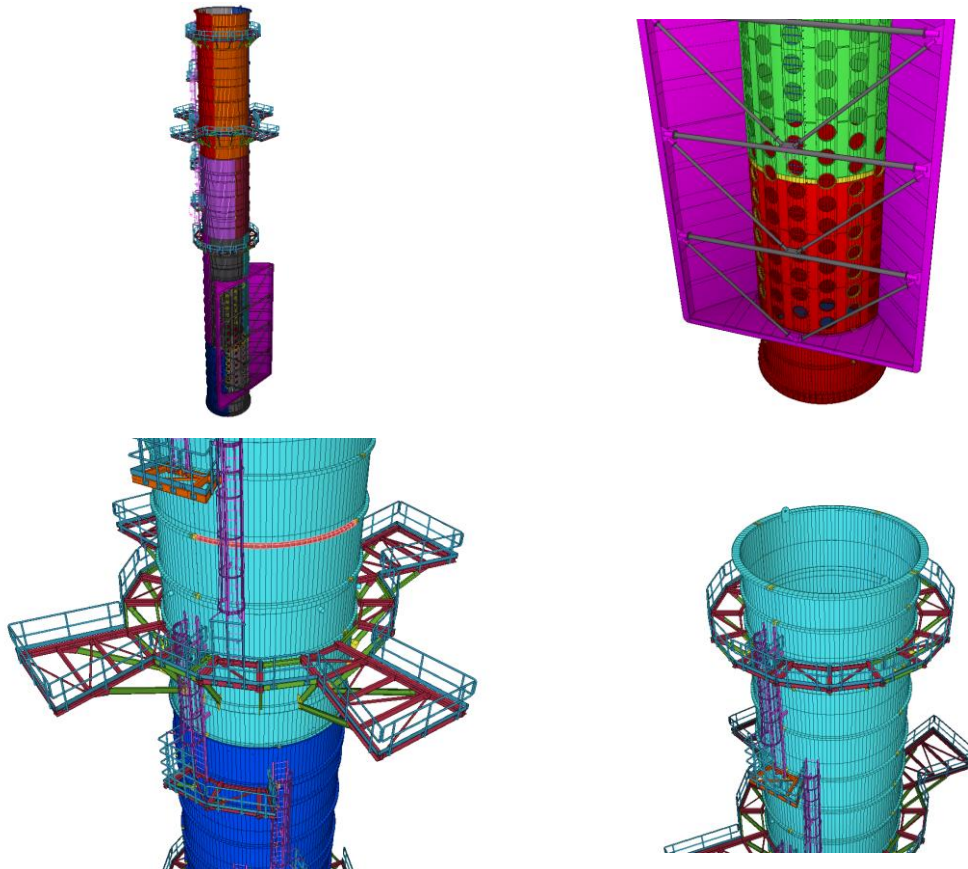
Η μεγαλύτερη διάσταση της διαμέτρου καθιστά την περιφερειακή κάμψη (λόγω ανομοιόμορφης κατανομής ανεμοπιέσεων) περισσότερο κρίσιμη. Χωρίς τη χρήση θεωρίας κελυφών, η περιφερειακή κάμψη εκτιμάται με τη χρήση υπολογιστικών τύπων που παρέχουν οι κανονισμοί (ASME STS-1 και CICIND). Επειδή όμως η περιφερειακή κάμψη δεν εξαρτάται μόνο από τη διάμετρο αλλά και από το μέγεθος και απόσταση των νευρώσεων, συνιστάται να σχεδιάζονται οι καμινάδες μεγάλης διαμέτρου σύμφωνα με τη θεωρία κελυφών.

5. ΒΙΟΜΗΧΑΝΟΠΟΙΗΣΗ, ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΚΑΙ ΑΝΕΓΕΡΣΗ

Η μεταφορά επιβάλλει σημαντικές δεσμεύσεις στην περίπτωση καμινάδων μεγάλης διαμέτρου. Ο περιορισμός του πλάτους μεταφοράς σε περίπου 3 έως 4 μέτρα για συνήθεις επίγειες διαδρομές απαιτεί βιομηχανοποίηση και μεταφορά σε τεταρτημόρια ή κυκλικά τμήματα 120 μοιρών. Τα τμήματα αυτά πρέπει πρώτα να συναρμολογηθούν στο εργοτάξιο σε πλήρεις κυλίνδρους (cans) προτού συνεχισθεί η ανέγερση της καμινάδας. Συνεπώς, ακόμη και αν η συναρμολόγηση των επί μέρους κυλίνδρων μπορεί να επιτευχθεί μέσω κοχλιωτών συνδέσεων, οι περιορισμοί μεταφοράς θα επιβάλουν στο εργοτάξιο οργάνωση για εκτενείς συγκολλήσεις. Μια καμινάδα μεγάλης διαμέτρου απαιτεί σημαντικά μεγαλύτερο αριθμό εργοταξιακών κολλήσεων απ'ότι μια καμινάδα μικρότερης

διαμέτρου. Επιπροσθέτως, το εργοτάξιο πρέπει να διαθέτει την οργάνωση και εξοπλισμό για τη διασφάλιση των απαιτούμενων ανοχών κατά τη σύνθεση των κυλίνδρων από τα επί μέρους κυκλικά τμήματα, μέσω των αντίστοιχων προσωρινών κατασκευών.

Οι δεσμεύσεις στη μεταφορά μεταφράζονται αντίστοιχα και σε πρόσθετες απαιτήσεις στο στάδιο του σχεδιασμού, καθότι η διάκριση μεταξύ εργοταξιακών και εργοστασιακών συγκολλήσεων και η αντίστοιχη αντιμετώπισή τους αποτελούν ευθύνη του μελετητή. Έχει αποδειχθεί πως η χρήση τρισδιάστατου προσομοιώματος κατά το σχεδιασμό είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική για την αντιμετώπιση των θεμάτων αυτών (βλ. όψεις από προσομοίωμα πρόσθετα ολοκληρωμένου έργου στην ακόλουθη εικόνα).



Εικ. 6 Προσομοίωμα σχεδιασμού βιομηχανοποίησης και ανέγερσης καμινάδας διαμέτρου 7.2 μ.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι μεταλλικές καμινάδες μεγάλης διαμέτρου εισάγουν ιδιαιτερότητες στο σχεδιασμό και τη βιομηχανοποίηση, οι οποίες πρέπει να λαμβάνονται υπόψη. Η υφιστάμενη τεχνική βιβλιογραφία, συμπεριλαμβανομένων και των τριών κυρίων διεθνών κανονισμών δεν αντιμετωπίζει ευθέως τις ιδιαιτερότητες αυτές. Η χρήση της θεωρίας κελυφών κρίνεται απαραίτητη για τις καμινάδες αυτές. Η ασυμφωνία μεταξύ του ASME STS-1 και των CICIND, EN στο θέμα της αντιμετώπισης του λυγισμού για διαμέτρους άνω των 4 μ πρέπει να διερευνηθεί περαιτέρω.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] CICIND, "Model Code for Steel Chimneys", CICIND, 2010.
- [2] ASME STS-1, "Steel Stacks", ASME , 2006.
- [3] CEN- European Committee for Standardization, "EN 1993-3-2 Eurocode 3 - Design of Steel Structures – Part 3-2: Towers, masts and chimneys - Chimneys", European Committee for Standardization, 2006.
- [4] CEN- European Committee for Standardization, "EN 1993-1-6 Eurocode 3 - Design of Steel Structures – Part 1-6: Strength and Stability of Shell Structures", European Committee for Standardization, 2007.
- [5] ANGELIDES, M., "Earthquake Design for Steel Chimneys" in CICIND Technical Manual, 2011.

DESIGN AND CONSTRUCTION OF LARGE DIAMETER STEEL CHIMNEYS

Michael Angelides

Structural Engineer

AMTE Consulting Engineers

Athens, Greece

e-mail: amte@otenet.gr

SUMMARY

Steel chimney diameters did not use to exceed 4 meters and this is reflected in the relevant technical literature. However, the development and proliferation of combined cycle power plants has led to boiler exhaust stacks with diameters in the order of 7-8 meters. The particularities associated with large diameter steel chimneys and their impact on design and construction are presented and discussed, with reference to the major steel chimney design codes. Shell theory needs to be used in the design of such chimneys. The current technical literature, including the major international design codes do not directly address these issues.